



# Instituto Politécnico Nacional

---

Centro de Investigación en Computación

Maestría en Ciencias de la Computación  
Laboratorio de Lenguaje Natural y Procesamiento de Texto

## Generación de música con gramáticas formales

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA

**Ing. Rodrigo Gabino Ramírez Moreno**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. ALEXANDER GELBUKH**

México, D. F., 2011





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 16:00 horas del día 24 del mes de Noviembre de 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del:

**Centro de Investigación en Computación**

para examinar la tesis titulada:

**"GENERACIÓN DE MÚSICA CON GRAMÁTICAS FORMALES"**

Presentada por el alumno:

**RAMÍREZ**  
Apellido paterno

**MORENO**  
Apellido materno

**RODRIGO GABINO**  
Nombre(s)

Con registro: 

B	0	9	1	6	5	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis

Dr. Alexander Gelbukh

Dr. Sergio Suárez Guerra

Dr. Grigori Sidorov

Dr. René Arnulfo García Hernández

Dr. Oscar Celma Herrada

Dr. Marco Antonio Moreno Ibarra

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Dr. Luis Alfonso Mila Vargas  
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN



# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

*SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO*

## *CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de **México D. F.** el día **25** del mes de **noviembre** del año **2011**, el (la) que suscribe C. **Rodrigo Gabino Ramírez Moreno** alumno (a) del Programa de **Maestría en Ciencias de la Computación** con número de registro **B091657**, adscrito al **Centro de Investigación en Computación** del **Instituto Politécnico Nacional**, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Alexander Gelbukh** y cede los derechos del trabajo intitulado “*Generación de música con gramáticas formales*” al **Instituto Politécnico Nacional** para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico **jadwer@msn.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

Rodrigo Gabino Ramírez Moreno

## **Resumen**

*En el contexto de la composición musical algorítmica, en el presente trabajo se propone una metodología para la generación de una obra musical completa a partir del uso de gramáticas jerarquizadas. Dichas gramáticas son proporcionadas mediante la especificación del estilo musical y parámetros de profundidad, duración y construcción para la generación de ésta. Además se describe la manera de evaluar los resultados obtenidos a partir de esta metodología. A lo largo del documento se describe la evolución de la metodología propuesta así como los detalles y casos especiales que se toman en cuenta para el desarrollo de las mismas.*

## **Abstract**

*In the context of algorithmic music composition, this paper proposes a methodology for the generation of a complete musical piece based on the use of hierarchical grammars. These grammars are provided by specifying the parameters of musical style and depth, duration and construction for this generation. It also describes how to evaluate the results obtained from this methodology. Throughout the paper describes the evolution of the proposed methodology and the details and special cases are taken into account in their development.*

## **Agradecimientos**

A mi padre, por creer en mí, por apoyarme a su manera y enseñarme a vivir como un hombre. A mi madre, por todo su apoyo, trabajo y empuje durante todo mi proceso académico. Por defenderme con la familia. Por volver a mantenerme durante este último semestre a pesar de los obstáculos económicos que sufrió.

A mi hermano, por demostrarme que todo logro tiene un sacrificio y cada paso requiere de mucho esfuerzo. Por ser mi más grande apoyo.

A mi novia, por darme el tiempo para trabajar y apoyarme en todo lo que pudo, tanto económica como moralmente.

A Marco, porque sé que todo lo que logre o deje de lograr servirá como ejemplo para su desarrollo y esa es una motivación muy grande.

A mi familia, por demostrarme cuanto me quieren y me apoyan, todos a su extraña manera. A mis amigos, por dejarme platicar mis ideas con ellos y lograr aterrizarlas en algo que ahora tiene forma.

A mis profesores: Alexander, por enseñarme a mirar las cosas desde un punto de vista más completo. A Grigori, por ser un gran apoyo durante el año de ausencia del Dr. Gelbukh. A Sergio y Marco por su curiosidad y buena vibra para desarrollar este trabajo. Y a los Doctores Oscar y René por toda su colaboración y la buena disposición a ser parte en la evaluación de este trabajo.

A Mägo de Oz, por amenizar tantas horas de trabajo con buena música e inspirarme a seguir con esto.

Al Instituto Politécnico Nacional, por todo lo que he aprendido al ser parte de él. Al CONACYT por que a través de él, el pueblo de México ha patrocinado mi trabajo y al pueblo debo estos resultados.

A todos los que me faltaron y que me reclamarán al ver que no los mencioné.

## Tabla de contenido

<b>CARTA CESIÓN DE DERECHOS .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE GRÁFICAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.1.1 Aproximaciones básicas.....	1
1.1.2 Problema a resolver .....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.2.1 Relevancia y pertenencia.....	4
1.3 OBJETIVOS .....	4
1.3.1 Objetivo general .....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 APORTACIONES .....	5
1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS .....	6
<b>CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>8</b>
2.1 PUBLICACIONES RELEVANTES .....	8
2.1.1 Usando gramáticas.....	8
2.1.2 Razonamiento basado en casos.....	12
2.1.3 Métodos de representación y visualización musical .....	16
2.1.4 Algoritmos genéticos .....	17
2.1.5 Redes neuronales.....	20
2.2 AUTORES RELEVANTES Y SUS APORTACIONES .....	21
<b>CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>26</b>

3.1	TEORÍA MUSICAL.....	26
3.1.1	<i>El sonido</i> .....	26
3.1.2	<i>La música</i> .....	27
3.1.3	<i>Escritura musical</i> .....	29
3.1.4	<i>Relación entre las notas</i> .....	35
3.1.5	<i>La afinación</i> .....	36
3.1.6	<i>Los intervalos</i> .....	37
3.1.7	<i>Escalas</i> .....	41
3.1.8	<i>Acordes</i> .....	48
3.1.9	<i>La armonía</i> .....	49
3.2	GRAMÁTICAS .....	54
3.2.1	<i>Elementos constituyentes</i> .....	54
3.2.2	<i>Mecanismos de especificación</i> .....	55
3.2.3	<i>Definición formal</i> .....	55
3.2.4	<i>Derivaciones</i> .....	56
3.3	JERARQUÍA DE CHOMSKY .....	56
3.3.1	<i>Gramáticas de tipo 0</i> .....	56
3.3.2	<i>Gramáticas de tipo 1</i> .....	57
3.3.3	<i>Gramáticas de tipo 2</i> .....	57
3.3.4	<i>Gramáticas de tipo 3</i> .....	58
3.4	NOTACIÓN ABC.....	59
3.4.1	<i>El formato</i> .....	60
3.5	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	61
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....</b>		<b>62</b>
4.1	ALGORITMO GENERAL .....	62
4.1.1	<i>Estructura de una obra musical</i> .....	62
4.2	LA BASE DE DATOS .....	64
4.3	LOS MÓDULOS .....	65
4.3.1	<i>El proceso de generación de la progresión por compás</i> .....	65
4.3.2	<i>El proceso de generación de los grados</i> .....	65
4.3.3	<i>El proceso de generación de la melodía</i> .....	67
4.3.4	<i>El proceso de generación de la armonía</i> .....	70
4.3.5	<i>El proceso de generación de un instrumento rítmico-melódico</i> .....	72
4.3.6	<i>Los valores de los intervalos</i> .....	74
4.3.7	<i>La cadencia final</i> .....	76

4.3.8	<i>El proceso de armado de la progresión.....</i>	76
4.3.9	<i>Las reglas de producción de las escalas.....</i>	77
<b>CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN.....</b>		<b>85</b>
5.1	OBTENCIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN .....	85
5.2	LOS ASPECTOS DE EVALUACIÓN .....	85
5.2.1	<i>La melodía.....</i>	85
5.2.2	<i>La armonía.....</i>	86
5.2.3	<i>El estilo .....</i>	87
5.2.4	<i>Las secciones.....</i>	87
5.2.5	<i>La herramienta.....</i>	87
5.3	LA FORMA DE EVALUACIÓN .....	88
5.3.1	<i>Método comparativo.....</i>	88
5.3.2	<i>Cuestionarios .....</i>	88
5.4	OBTENCIÓN DE LOS DATOS .....	89
5.4.1	<i>Preguntas cerradas dicotómicas. ....</i>	89
5.4.2	<i>Preguntas cerradas con varias opciones de respuesta.....</i>	89
5.4.3	<i>Preguntas de respuestas múltiples. ....</i>	89
5.4.4	<i>Preguntas de jerarquización .....</i>	90
5.4.5	<i>Preguntas de evaluación numérica .....</i>	90
5.4.6	<i>Preguntas abiertas.....</i>	90
5.5	FORMATOS DE EVALUACIÓN USADOS (CUESTIONARIOS) .....	91
5.5.1	<i>Representación de la evaluación.....</i>	95
5.6	RESULTADOS OBTENIDOS.....	95
5.6.1	<i>Aspectos básicos.....</i>	95
5.6.2	<i>Aspectos avanzados .....</i>	101
5.7	EVALUACIÓN COMPARATIVA Y TEST DE TURING .....	107
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>		<b>111</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	111
6.2	APORTACIONES .....	112
6.3	TRABAJO FUTURO.....	113
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>115</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>124</b>
8.1	GRAMÁTICAS .....	124

8.1.1	<i>Gramática de la cadencia</i> .....	124
8.1.2	<i>Implementación de un instrumento melódico</i> .....	124
8.1.3	<i>Implementación de un instrumento armónico</i> .....	127
8.1.4	<i>Implementación de un instrumento rítmico-melódico</i> .....	128
8.1.5	<i>Componentes musicales básicos</i> .....	128
8.2	ARCHIVO GENERADO .....	130

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. División jerárquica de una pieza musical .....	14
Ilustración 2. Relaciones horizontales en la jerarquía.....	14
Ilustración 3. Iteración sobre la estructura jerárquica.....	15
Ilustración 4. Núcleo ontológico del Meta-Modelo EV.....	17
Ilustración 5. Representación del pentagrama .....	30
Ilustración 6. Forma y posición de las claves sobre el pentagrama .....	31
Ilustración 7. Notas con uniones .....	31
Ilustración 8. Indicación de compás.....	32
Ilustración 9. Ejemplo de la indicación de compás.....	32
Ilustración 10. Compases con ligadura y puntillo.....	34
Ilustración 11. Enarmonía de Sol# y Lab.....	37
Ilustración 12. Diferencia entre intervalo melódico y armónico .....	40
Ilustración 13. Representación de la escala de Re Mayor.....	42
Ilustración 14. Partitura del ejemplo usando ABC .....	61
Ilustración 15. Estructura de una obra musical.....	62
Ilustración 16. Diagrama de flujo del algoritmo general .....	63
Ilustración 17. Diagrama de bloques para cada sección .....	64
Ilustración 18. Árbol de tareas .....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de cifrado .....	29
Tabla 2. Figuras musicales.....	31
Tabla 3. Correspondencia de silencios y figuras.....	33
Tabla 4. Comparación de tiempos con y sin puntillo.....	33
Tabla 5. Símbolo y función de las alteraciones .....	34
Tabla 6. Nombres de las notas de la escala cromática.....	37
Tabla 7. Nombre, clasificación y distancia entre intervalos .....	39
Tabla 8. Relación entre intervalos.....	41
Tabla 9. Estructura de la escala mayor .....	42
Tabla 10. Estructura de la escala menor natural .....	43
Tabla 11. Estructura de la escala menor armónica .....	43
Tabla 12. Estructura de la escala pentatónica mayor .....	44
Tabla 13. Estructura de la escala pentatónica menor.....	44
Tabla 14. Estructura del modo jónico .....	45
Tabla 15. Estructura del modo dórico.....	45
Tabla 16. Estructura del modo frigio .....	45
Tabla 17. Estructura del modo lidio.....	45
Tabla 18. Estructura del modo mixolidio.....	46
Tabla 19. Estructura del modo eólico .....	46
Tabla 20. Estructura del modo locrio.....	46
Tabla 21. Nombre de los grados .....	47
Tabla 22. Tipos de triadas.....	49
Tabla 23. Tipos de Cuatriadas.....	50
Tabla 24. Triadas de las escalas mayores .....	51
Tabla 25. Cuatriadas de las escalas mayores .....	52
Tabla 26. Triadas de las escalas menores naturales.....	52
Tabla 27. Triadas de las escalas menores armónicas.....	53

Tabla 28. Triadas de las escalas menores naturales .....	53
Tabla 29. Triadas de las escalas menores armónicas .....	54
Tabla 30. División de los compases y asignación de fuerza y tipo de nota .....	67
Tabla 31. Intervalo de la escala mayor para la construcción de la gramática.....	78
Tabla 32. Intervalo de la escala menor para la construcción de la gramática.....	78
Tabla 33. Intervalo de la escala pentatónica mayor para la construcción de la gramática.....	79
Tabla 34. Intervalo de la escala pentatónica menor para la construcción de la gramática.....	79
Tabla 35. Intervalo del modo jónico para la construcción de la gramática .....	80
Tabla 36. Intervalo del modo dórico para la construcción de la gramática .....	80
Tabla 37. Intervalo del modo frigio para la construcción de la gramática.....	81
Tabla 38. Intervalo del modo lidio para la construcción de la gramática .....	81
Tabla 39. Intervalo del modo mixolidio para la construcción de la gramática.....	82
Tabla 40. Intervalo del modo eólico para la construcción de la gramática.....	82
Tabla 41. Intervalo del modo locrio para la construcción de la gramática .....	83
Tabla 42. Formato de definición de criterios de evaluación.....	85
Tabla 43. Criterios de evaluación para la melodía.....	85
Tabla 44. Criterios de evaluación para la armonía.....	86
Tabla 45. Criterios de evaluación para el estilo .....	87
Tabla 46. Criterios de evaluación para las secciones.....	87
Tabla 47. Criterios de evaluación para la herramienta.....	87
Tabla 48. Aspectos básicos de la melodía en valores binarios .....	95
Tabla 49. Aspectos básicos de la melodía en valores ternarios .....	96
Tabla 50. Aspectos básicos de la melodía en porcentajes.....	97
Tabla 51. Aspectos básicos de la armonía en valores binarios .....	98
Tabla 52. Aspectos básicos de la armonía en porcentaje.....	99
Tabla 53. Aspectos básicos de la cadencia en valores binarios .....	100
Tabla 54. Aspectos básicos de la cadencia en valores .....	100
Tabla 55. Aspectos avanzados de la melodía en valores binarios .....	101

Tabla 56. Aspectos avanzados de la melodía en valores ternarios .....	102
Tabla 57. Aspectos avanzados de la melodía en valores .....	103
Tabla 58. Aspectos avanzados de melodía en valores porcentuales.....	104
Tabla 59. Aspectos avanzados de la armonía en promedios.....	105
Tabla 60. Aspectos avanzados de la cadencia en promedios.....	105
Tabla 61. Aspectos avanzados del estilo en promedios .....	106
Tabla 62. Aspectos avanzados .....	107
Tabla 63. Resultados del test de Turing.....	108
Tabla 64. Resultados del test de Turing.....	109

## **LISTA DE GRÁFICAS**

Gráfica 1. Aspectos básicos de la melodía en valores binarios .....	96
Gráfica 2. Aspectos básicos de la melodía en valores ternarios .....	97
Gráfica 3. Aspectos básicos de la melodía en porcentajes.....	98
Gráfica 4. Aspectos básicos de la armonía en valores binarios .....	99
Gráfica 5. Aspectos básicos de la armonía en porcentaje .....	99
Gráfica 6. Aspectos básicos de la cadencia en valores binarios .....	100
Gráfica 7. Aspectos básicos de la cadencia en valores .....	101
Gráfica 8. Aspectos avanzados de la melodía en valores binarios.....	102
Gráfica 9. Aspectos avanzados de la melodía en valores ternarios .....	103
Gráfica 10. Aspectos avanzados en valores .....	103
Gráfica 11. Aspectos básicos de la cadencia en valores .....	104
Gráfica 12. Aspectos avanzados de armonía .....	105
Gráfica 13. Aspectos avanzados de la cadencia en promedios.....	106
Gráfica 14. Aspectos avanzados del estilo en promedios .....	107

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las disciplinas que constituyen el conocimiento humano, el desarrollo artístico tiene un lugar importante ya que está presente en todas sus obras. Para facilitar la aplicación de los conocimientos artísticos es posible usar ramas de la inteligencia artificial como los sistemas expertos, las cadenas de Markov, autómatas celulares, redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos y gramáticas, por mencionar algunas. La música, definida como un lenguaje, es el conjunto de signos y reglas que permiten la comunicación de su contenido, esto nos lleva a abstraerla por medio de gramáticas formales. Una de las principales aplicaciones de la computación en el área de la música ha sido la composición de secuencias musicales, a lo cual se ha denominado composición musical asistida por computadora.

### 1.1 Definición del problema

La mayoría de los estilos de música tonal respetan la base de la teoría musical pero difieren en sutilezas específicas para cada uno de ellos, por lo que se necesita una herramienta que genere música a partir de bases sólidas en la teoría pero que sea dinámica para adaptarse a las reglas de producción de cada estilo y que sea posible que lo utilice tanto una persona sin conocimientos en música como por expertos en la materia.

#### 1.1.1 Aproximaciones básicas

Existe a *Musical Generator*, que es un programa que genera melodías a partir de fractales, sistemas dinámicos, mapas complejos, números y texto. Este sistema, aunque parece completo, solamente aproxima los valores de las cadenas generadas por los otros sistemas y los acomoda según la proximidad a una nota de la escala dada.

Existen también programas como *contextFree Art* que, usando parámetros y reglas definidas por los usuarios, genera imágenes de cierto tipo, se agregó como

aproximación básica porque tiene un enfoque similar a lo que se ha realizado en este trabajo pero aplicado a imágenes.

### **1.1.2 Problema a resolver**

Para generar una melodía, y más si se quiere componer una cadencia o llegar al discurso musical, es obligatorio e indispensable tener nociones musicales para el uso de instrumentos planos, como la guitarra o el piano.

Los sintetizadores electrónicos dan la posibilidad de orquestar un acorde o nota según el estilo programado, pero no genera un discurso musical, es decir, se necesita tener las nociones de armonía para generar una progresión coherente, además de que no ofrece una melodía sobre el acorde orquestado.

Los generadores actuales no aportan una base teórica musical fuerte, en donde se puedan modificar las definiciones de cada una de las partes de la pieza musical a generar y no crean una cadencia musical coloreada en base a reglas establecidas. Otros sólo generan melodías sobre una escala definida sin darle la importancia a la cadencia, careciendo así de un discurso musical.

## **1.2 Justificación**

La elaboración de este trabajo no es trivial debido a que se aplican los métodos lingüísticos al discurso musical para crear una herramienta orientada a la composición asistida por computadora creando una gramática de manera dinámica según las especificaciones del usuario.

A continuación se enuncian algunos beneficios que se obtienen con el desarrollo de esta herramienta.

- **Beneficios de tipo social:** El usuario no necesita poseer un conocimiento exhaustivo en música o computación, así que puede usarse por cualquier persona. También aporta inspiración a los compositores que necesitan una ayuda para iniciar algo más creativo. Además, si se tiene un conocimiento avanzado de

música, el usuario puede definir sus propias reglas de producción para generar obras más elaboradas.

- **Beneficios de tipo económico:** No se requiere del pago de uso por derechos de autor ya que es una melodía generada dinámicamente, además, se elimina la necesidad de contratar a un experto para proyectos de bajo presupuesto o prototipos.
- **Beneficios de tipo técnico:** Ahorro de tiempo invertido para composiciones con poco conocimiento musical.
- **Beneficio de tipo científico:** Generación de gramáticas de manera dinámica. El uso de la herramienta para musicoterapia.
- **Beneficio de tipo docente:** Apoyo para los maestros y estudiantes de música en las áreas de composición, melodía y armonía.

Henri Poincaré dijo que *“Todo saber tiene de ciencia lo que tiene de matemática”*, y bajo este enfoque es muy difícil dar el carácter científico a la música, ya que es considerada una creación artística y subjetiva, pero la música, como la conocemos y la disfrutamos hoy en día a nivel mundial, ha cambiado con el gusto de las personas y ha evolucionado según la región o cultura, por lo que se han ido aportando reglas para cada estilo. Y debido a que la música usa estas reglas es posible representarla usando gramáticas.

A continuación se enuncian algunas aplicaciones que se le pueden dar a la herramienta desarrollada:

- Como auxiliar para personas no dedicadas a la música que requieren una pieza musical como soporte secundario a una creación particular.
- Para el uso en la musicoterapia generando melodías del estilo que se requiera.
- Como una herramienta para el refuerzo cognoscitivo en estudiantes de música.

— Da inspiración a compositores que requieran realizar una obra pero necesiten una base creativa para iniciar o nutrir un trabajo propio.

— Musicalización de videos, películas o trabajos que no puedan usar música registrada o se quiera usar una melodía original.

### **1.2.1 Relevancia y pertinencia**

El uso de aplicaciones que faciliten los trabajos específicos a personas no dedicadas a un área en específico genera la necesidad de la automatización de ciertas tareas. Esto aplica en el campo de la música, en donde se tienen pistas y melodías ya existentes para el uso de estas en trabajos no enfocados a música, como la musicalización de un video o el uso de ciertas melodías para desarrollo de juegos o usos comerciales. Pero este tipo de recursos genera la reutilización de material que puede estar registrado bajo derecho de autor o la simple duplicidad de una pieza en diferentes trabajos, por lo que es importante una herramienta que genere melodías originales de manera dinámica.

He decidido realizarlo porque he tenido una formación en la ejecución de instrumentos musicales, y dentro de esa formación adquirí las bases necesarias para la composición de nuevas obras. Este conocimiento se puede formalizar en gramáticas que apliquen a la mayoría de estilos musicales y desarrollar una herramienta computacional que genere una pieza musical a partir de ellas.

## **1.3 Objetivos**

A continuación se describe el objetivo general de esta tesis y los objetivos específicos definidos para alcanzar dicho objetivo.

### **1.3.1 Objetivo general**

Generar composiciones musicales completas a partir de parámetros dados por el usuario, de manera que se genere la cadencia para cada sección de la obra de manera automática, generar la base armónica para cada sección y una melodía de manera

dinámica para cada una respetando los tiempos y ritmos, usando las secciones de la manera establecida ya sea por el estilo definido o por el usuario.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Se exponen a continuación los objetivos específicos que contribuyen a complementar el objetivo general del presente trabajo.

1. Seleccionar una representación musical mediante la cual se puedan procesar las cadenas generadas de manera óptima.
2. Definir la jerarquía de una obra musical independientemente del estilo.
3. Dar una estructura jerarquizada para la composición de una melodía.
4. Dar los mecanismos de iteración para las partes que requieran repetición o modificación.
5. Definir las gramáticas básicas para la teoría musical fundamental.
6. Desarrollar una herramienta que genere una pieza musical a partir de parámetros definidos por el usuario, creando una gramática de manera dinámica para la composición de una obra musical.

## **1.4 Aportaciones**

Las aportaciones de este trabajo son las siguientes.

- Método para la generación de música basado en gramáticas construidas dinámicamente de manera jerárquica.
- Reglas de producción para generar la progresión de cada sección de la obra musical.
- Reglas de producción para los intervalos relativos y absolutos.
- Reglas de producción para la definición de la métrica de un instrumento melódico.

- Reglas de producción para la definición de un instrumento armónico.
- Reglas de producción para la definición de un instrumento rítmico-melódico.
- Herramienta basada en gramáticas simples para la generación de melodías.
- Herramienta basada en gramáticas dinámicas jerarquizadas para la generación de composiciones musicales.

## 1.5 Organización de la tesis

Durante los capítulos del presente documento se da una revisión a los trabajos destacados que han hecho alguna aportación relevante dentro de esta área de conocimiento, un panorama general de los fundamentos teóricos, una explicación detallada de la metodología utilizada para abordar cada problema planteado así como los resultados y conclusiones a los que se ha llegado. A continuación se presenta una breve descripción de lo que se encontrará en cada capítulo de esta tesis.

El *Capítulo 1*, Aborda el tema del que se trata este trabajo, ubicando al lector en las ramas de la ciencia a las que atañe, justifica el trabajo realizado e informa de los objetivos y aportaciones que fueron derivados de él.

El *Capítulo 2*, da una revisión a los trabajos publicados por otras personas interesadas en la composición asistida por computadora, destacando las aportaciones de cada uno y revisando los puntos fuertes y débiles de cada trabajo.

El *Capítulo 3*, describe las bases teóricas que son fundamentales para la comprensión del trabajo posteriormente descrito. Explica de manera puntual los conceptos de la base musical armónica y melódica, el tipo y uso de gramáticas y la representación musical usando una notación en texto plano.

El *Capítulo 4*, da una descripción detallada de la metodología utilizada para la composición de nuevas obras musicales basadas en gramáticas.

El *Capítulo 5*, da una descripción detallada de la metodología utilizada para la evaluación de nuevas obras musicales basadas en gramáticas. También se describen de manera detallada los resultados obtenidos y su evaluación.

El *Capítulo 6*, presenta un informe de las conclusiones obtenidas del presente trabajo y se comentan los problemas que quedan por resolver para un trabajo futuro.

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1 Publicaciones relevantes

En este capítulo se da una revisión a los métodos propuestos para la composición musical y se mencionan los más relevantes.

##### 2.1.1 Usando gramáticas

Son publicaciones que han hecho uso de las gramáticas para la generación de música, se han dado diferentes enfoques, los más importantes son los siguientes.

###### 2.1.1.1 Gramáticas formales

El autor del artículo *Improvising Jazz Chord Sequences by Means of Formal Grammars* (Chemillier, 2001) se basa en el trabajo de las gramáticas de Steedman (Steedman, 1984) y Coker (Coker, 1987) para implementar expresiones y técnicas de sustitución en un conjunto de acordes dados. Menciona que, debido a que existen reglas en donde un símbolo terminal también es un no terminal, tuvo problemas para usar un *parser* como LEX o YACC.

La solución dada a este problema fue la formalización de aspectos gramaticales. Por ejemplo, existe una regla del tipo  $G G7 \rightarrow Dm7 G7$  en donde dependiendo de dos símbolos, se generan dos nuevos símbolos, además, existe una sustitución del tipo  $C7 \rightarrow Gm7 C7$  en la cual, dos símbolos deben de compartir el mismo rango de tiempo dado para un solo símbolo. Esto lo solucionaron usando barras diagonales para definir la cantidad de acordes dentro del rango, dividiendo este tiempo entre la cantidad de acordes dados, es decir  $/C7/$  ocupa el mismo tiempo que  $/ Gm7 C7 /$ . Implementando esto en LEX y regresando una cadena correctamente.

Luego, el sistema está compuesto por dos módulos. El primero genera iteraciones con la secuencia dada aplicando aleatoriamente sustituciones en los acordes. El segundo

selecciona expresiones o voces para la sucesión de acordes del resultado anterior seleccionando las voces muestreadas de una base de datos.

1. (rewriting \*basic-grid\* 1)

((C) / (C) / ((G\*)7) / (C7) / (F) / (F) / (C) / (C) / (G) / (G7) / (C) / (C)) /

2. (rewriting \*basic-grid\* 10)

((C) / (C) / (C) / ((C#)7) (C7) / (F) / ((F#)7) / ((F\*)7) / ((Bb\*)7) / ((Eb\*)((Eb\*)7) / ((D\*)7) ((C#)7) / (C) / (C))

Se puede ver en el ejemplo anterior cómo se conservan los 12 compases originales pero con las variaciones de la sustituciones aplicadas iterativamente.

### **Aportaciones**

Ofrece un enfoque a la dependencia hacia atrás que aporta un buen empuje para el discurso musical.

### **Puntos débiles**

El usar sustituciones dependientes de acordes anteriores da un rango limitado de abstracción musical por lo que tienen que escribir todas las reglas.

El autor solo menciona los dos acordes por compás por los que se pueden sustituir, pero no dan los tiempos a ocupar, esto es importante porque existen sustituciones que solo dan énfasis al siguiente acorde o se usan como acordes de paso.

#### **2.1.1.2 Gramáticas evolutivas**

En el artículo *Automatic composition of music by means of Grammatical Evolution* (Ortega y Alfonseca, 2007) se utilizaron la evolución gramatical para generar melodías automáticamente para que suenen como si hubiera sido compuesta por un autor humano. Primeramente se traducen melodías reconocidas a AP440 que es un procesador de audio. Luego de estos se obtienen  $n$  parámetros de éstas melodías para que se parezcan más a una composición humana. Finalmente se puede usar la evolución gramatical para generar las melodías especificadas por una función de idoneidad.

Dieron una gramática para AP440 y tomaron en cuenta una población inicial de 64 vectores de 32 codons (notas) aleatorios. Los operadores genéticos que utilizaron

fueron de crossover, mutación, ampliación que empalma el genotipo y otra cadena de codons y un operador de corte que remueve algunos codons. Descartaron 16 individuos de una generación a otra.

### **Aportaciones**

La utilización de evolución gramatical es un enfoque que puede adaptarse a diferentes métodos de generación de melodías.

### **Puntos débiles**

Los autores no refirieron los parámetros de evaluación de las melodías generadas.

Tampoco se definen cuáles o cómo se obtuvieron los valores dados de manera probabilística

#### **2.1.1.3 Composición basada en gramáticas**

En *Grammar-Based Music Composition* (McCormack 1996) realizaron un sistema basando en las cadenas de Markov y las L-grammar, utilizando gramáticas libres de contexto de alta complejidad basadas en jerarquías, en donde cada uno de los símbolos de una gramática puede ser una gramática entera.

Lo han generado en una estación de trabajo de Silicon Graphics conectado a un sintetizador MIDI. Lo han implementado alimentando el sistema con varios tipos de gramáticas para generar secuencias MIDI en tiempo real.

El algoritmo utilizado es: gramática de L-System → parse grammar → iteración [Aplicar las reglas] → Interpretar melodía → Datos MIDI o Partitura generada.

Llegaron a generar gramáticas básicas para aplicar a música polifónica, dando reglas basadas en notas anteriores. Por ejemplo:

(C E G) → (G B D) Si se tocan las notas C E G simultáneamente, se deben tocar las notas G B D simultáneamente.

CE | G → D Si la nota actual es G precedida por C y E, entonces toca D.

(CE)|GC → D ( C E ) Si las notas actuales son G y C simultáneamente precedidas por las notas C y E tocadas simultáneamente. Tocar D seguida de C y E simultáneamente.

Para comprender mejor este ejemplo, se puede ver el cifrado en la Tabla 1 de la sección 3.1.2.3 del presente trabajo.

### **Aportaciones**

Aporta una jerarquización de las gramáticas para ser usables dentro de las mismas gramáticas.

### **Puntos débiles**

Utilizan reglas para cada nota, lo que significa que se tiene que definir el universo completo en lugar de abstraer las reglas por los intervalos.

La clasificación por estilo del autor puede ser errónea debido a que un mismo autor tiene composiciones de diferentes estilos musicales.

#### **2.1.1.4 Enfoque gramatical**

En el artículo *A Grammatical Approach to Automatic Improvisation* (Keller y Morrison, 2007) los autores le dan un enfoque gramatical a la creación de *licks* para la improvisación de solos de Jazz. Proponen dar un enfoque a las notas dadas de la siguiente forma:

C nota del acorde

L nota de “Color”

A una nota de enfoque

H una nota de apoyo, definida con alguna de las anteriores

S una nota de la escala

X una nota arbitraria

R una del resto

Le agregaron el tiempo por medio de probabilidades definiendo un compás como la probabilidad total, define los tiempos en 1 entero, 2 medio, 4 cuarto, 4. cuarto con

puntillo, 8 corchea, 16 semicorchea, 4/3 cuartos en tripleta, 8/3 corcheas en tripleta, 16/3 semicorcheas en tripleta.

Agregaron modificadores como + para aumentar una octava a la nota, - para disminuir una octava, # para sostenidos y b para bemoles. Pudiendo así representar una salida del tipo C+4 que representará un Do aumentado una octava que dura un cuarto de tiempo.

### **Puntos fuertes**

Consideraron un método de evaluación de sus resultados por medio de un experto en la enseñanza de la improvisación de solos de Jazz, además proponen una manera de evaluación usando un razonamiento basado en casos (CBR).

Permiten la modificación de las gramáticas por el usuario, permitiendo probar gramáticas propuestas por otras personas para definir improvisaciones sencillas para principiantes o técnicas de dificultad para intérpretes experimentados.

### **Puntos débiles**

Las probabilidades de ocurrencia de un evento han sido dadas de manera empírica.

## **2.1.2 Razonamiento basado en casos**

Los principales trabajos realizados utilizando el razonamiento basado en casos (CBR) se muestran en los siguientes puntos.

### **2.1.2.1 Composición automática**

En el artículo *Sistema de composición musical automática* (Gómez-Zamalloa, 2010). *Aproximaciones preliminares*, Miguel Gómez-Zamalloa se basa en el trabajo de David Cope (Cope, 2001), Michael Chan (Chan y Potter, 2006), Pereira, Grilo, Macedo y Cardoso (Pereira *et al.*, 1997), propone una arquitectura con módulos más o menos independientes usando Razonamiento Basado en Casos (CBR) todos controlados por un módulo central de control. Cada módulo con una tarea independiente y única. Los módulos que propone son: Un generador de melodías aisladas, un generador de armonías

aisladas, un armonizador de melodías, un generador de líneas melódicas alternativas (secundarias), un transformador de tiempos, un evaluador de calidad usando CBR y una unidad de control.

### ***Puntos fuertes***

La modularización del sistema permite trabajar más o menos en los módulos a cierta profundidad dejando trabajo futuro para perfeccionamiento.

La utilización de un sistema híbrido de razonamiento basado en reglas (RBR) y CBR.

Aporta una buena revisión de los trabajos que se habían elaborado hasta antes de la realización del artículo.

Considera la implementación de un módulo de evaluación de calidad usando CBR para mejorar sus futuras decisiones.

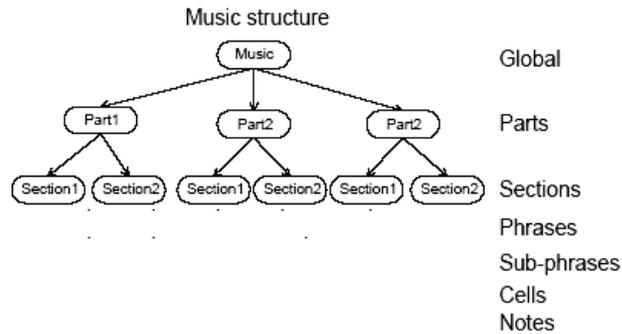
### ***Puntos débiles***

Aparentemente no se implementó el sistema propuesto en este artículo, debido a que no hay otras publicaciones acerca de la implementación de los módulos.

#### ***2.1.2.2 Usando CBR***

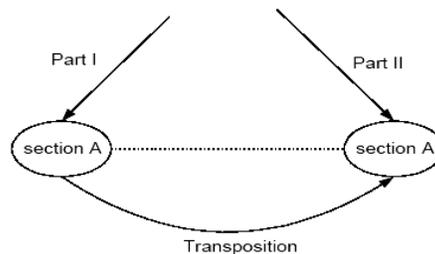
En el artículo *Composing Music with Case-Based Reasoning* (Pereira *et al.*, 1997) Los autores presentan una solución basada en análisis musical, CBR y las técnicas de planificación para la composición musical; de manera que las nuevas soluciones se obtienen transformando y extrapolando el conocimiento derivado de los análisis musicales, previamente realizados por expertos.

Cada análisis se lo representan como un caso, pudiendo éste ser dividido en todos sus subcomponentes y divide la pieza musical según la jerarquía mostrada en la Ilustración 1, obtenida del artículo referido:



**Ilustración 1. División jerárquica de una pieza musical**

Además de las relaciones jerárquicas mencionan que puede haber relaciones horizontales entre componentes. Así por ejemplo, en la figura siguiente se indicaría que la sección A de la parte 1 es la misma que la sección A de la parte 2 pero transportada. Ver la Ilustración 2.



**Ilustración 2. Relaciones horizontales en la jerarquía**

Así cada una de estas estructuras en forma de árbol, junto con las relaciones horizontales entre componentes, constituye un caso de donde extraen la información en el ciclo CBR.

Representan el caso como un hecho Prolog con la siguiente forma:

```
case_node( Case_Name, Node_Name, Temporal_Position, Constraints,
          Attributes, Antecedents, Consequents )
```

Destacan los atributos “antecedentes” y “consecuentes”, quienes describirán las relaciones del nodo con sus nodos superiores (respectivamente inferiores) en jerarquía, o previos (respectivamente posteriores) en tiempo. De esta forma relacionaron dos nodos arbitrarios de cualquier forma deseada.

Gran parte del dinamismo presente en la representación propuesta se deriva del hecho de que un caso también pueda ser considerado como un plan usando el modelo de Wallas para sistemas creativos, de forma que las relaciones temporales entre nodos e interpretadas como relaciones de causalidad en el análisis se trataran como sugerencias en la fase de composición.

Dividen el proceso de composición en cuatro fases de acuerdo con el modelo de Wallas:

- *Preparación*: Se cargan los casos en memoria y se define el problema a resolver como un nuevo caso (case\_node).
- *Incubación*: Se corresponde con la fase CBR de recuperación. Como resultado se tiene una serie de nodos ordenados según un criterio determinado.
- *Iluminación* (adaptación): Se intenta adaptar el primer nodo (si no es posible intenta con el segundo, etc).

Iteran desde la fase de preparación, ahora con el nuevo problema a resolver. El proceso continúa iterativamente en orden izquierda-derecha y arriba-abajo.

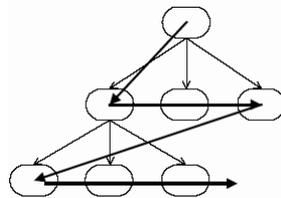


Ilustración 3. Iteración sobre la estructura jerárquica

- *Verificación*: Una vez construida por completo la nueva estructura comenzaría la fase de verificación, cuya tarea será la de evaluar la nueva composición de acuerdo con el estilo en cuestión. Actualmente está realizada en su totalidad por un analista musical.

Como se describe en la fase de recuperación, utilizan una métrica de similitud con el objetivo de clasificar los nodos según algún criterio determinado. Los autores basan su criterio en la siguiente idea: Las soluciones menos similares podrían ser potencialmente

las más creativas. Así, primeramente ordena la lista de nodos en orden descendente de similitud, para posteriormente invertir el primer 40% colocándolo al final. Por supuesto son conscientes de que la política elegida es algo “ciega”, aunque no obstante dicen que podría ser un buen punto de partida.

### **2.1.2.3 Puntos débiles**

Se parte inicialmente de una serie de análisis hechos por expertos, lo que implicará antes o después falta de flexibilidad.

El sistema no tiene una fase de aprendizaje, principalmente por la imposibilidad de crear nuevos casos al necesitarse para ello la intervención humana, en concreto en la fase de análisis.

La métrica de similitud melódica usada no parece demasiado consistente. Habría que buscar algún tipo de métrica de la similitud melódica que sea capaz de capturar determinadas características musicales de un corte más abstracto, de forma que se capturen aspectos de naturaleza creativa.

La capacidad creativa del sistema para generar nuevas ideas es bastante limitada. Los autores lo justifican diciendo que habría que extender la base de casos.

### **2.1.3 Métodos de representación y visualización musical**

Estos son los trabajos que aportan un método para la representación musical.

#### **2.1.3.1 Representación con el meta-modelo EV**

En el artículo *Representación del Conocimiento para la Composición Musical* (Alvaro, *et al.*, 2005), han generado un meta-modelo EV con el que se representa el conocimiento musical en base a eventos, es decir, todo lo que ocurre en la música es un evento, desde un tiempo total de desarrollo hasta una semifusa, pero este evento puede contener una lista de eventos, además cada evento está compuesto por un objeto dinámico, el cual puede contener una lista de objetos dinámicos. Esto produce una manera sencilla pero robusta para representar el conocimiento musical. En la Ilustración 4, obtenida del artículo referido, se muestra la relación anteriormente mencionada.

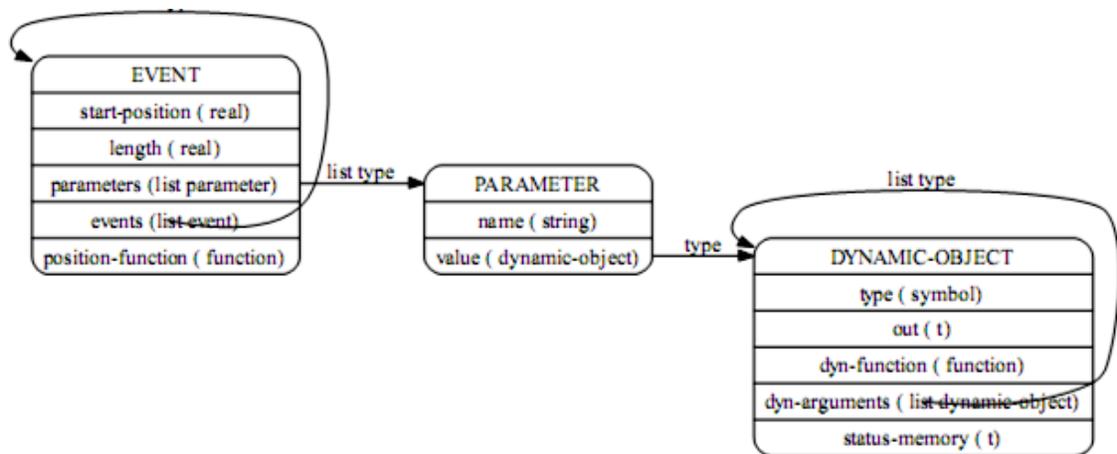


Ilustración 4. Núcleo ontológico del Meta-Modelo EV

El objeto evento contiene cualquier elemento que se pueda ubicar en el tiempo. Se compone de cinco slots: posición inicial, longitud, parámetros, eventos y función de posición. En el slot de parámetros, cada evento lleva asociado un nombre de parámetro y un objeto dinámico que tiene la capacidad de organizar su propia magnitud temporal, un ejemplo claro es el contrapunto.

Los Objetos Dinámicos tienen un valor evolutivo, es decir, tienen una magnitud viva o cambiante. Además, tienen una lista de objetos con magnitudes vivas, lo cual puede agregar valor a los sonidos programados.

### ***Puntos fuertes o aportaciones***

Generaron una visión general de la representación del conocimiento musical tomando en cuenta casos en los que pueden suceder dificultades que bajo este modelo se solucionan con el cambio de un par de parámetros.

### ***Trabajo no realizado***

No dan comparaciones con otro tipo de representación del conocimiento.

### **2.1.4 Algoritmos genéticos**

Los principales artículos que auxilian de algoritmos genéticos para la composición musical se muestran en las siguientes secciones.

#### **2.1.4.1 Algoritmos genéticos usando la notación ABC**

En el artículo *Genetic Algorithms and the ABC Music Notation Language for Rock Music Composition* (Oliwa, 2008) se describe la composición de música artificial utilizando distintos enfoques, paradigmas y algunas arquitecturas de redes neuronales o redes recurrentes con el fin de crear nuevas piezas musicales mediante un conjunto de datos existentes.

Es capaz de crear una estructura de una melodía con una duración arbitraria y un diverso reparto multi-instrumental. Las posibilidades de MIDI y la notación ABC permiten una representación muy rica de la música.

El problema con las redes neuronales recurrentes (RNN) es que en las dependencias a largo plazo, la música no puede representarse en la práctica, lo que conduce a la incoherencia musical. En este caso el resultado se ve prometedor sin embargo, sólo dos instrumentos se utilizan y el sistema que se presenta se limita a 13 notas para el instrumento principal y 12 notas para el instrumento de ritmo.

Cada bloque tiene la misma cantidad de elementos en cada iteración y por tanto, la segmentación del mismo separador, pero cada vez la población que se indica al principio, es una forma creada diferente. Así se garantiza que una canción con una estructura completamente nueva se realice cada vez que el algoritmo genético (GA) comienza. Esto permite que singularidad en el número de instrumentos utilizados y la estructura de cada de nueva creación.

Cada segmento de un genoma tiene su función de fitness asignada y es evaluada por sí mismo. La función de fitness ascendente escalar, crea escalas de tono lo que significa que todos los tonos deben ser superiores a su predecesor. La función de fitness escalar descendente es un análogo de la escala de tonos ascendente.

Señalan que a las composiciones musicales creadas, el GA del sistema le aporta mucha libertad, no sólo por la rica representación, sino también por la asignación al azar

del número y tamaño de los segmentos en los genomas, que se traduce en la asignación de diferentes funciones de fitness del conjunto.

Hacen mención de que la música que se representa por medio GA, puede crear música que compite y, según los autores, supera los enfoques de ese momento en términos de diversidad, virtuosismo y la variedad de instrumentos.

#### **2.1.4.2 Algoritmos genéticos y gramáticas**

El trabajo en el artículo *Music Composition Using Combination of Genetic Algorithms and Kohonen Grammar* (Sheikholharam y Teshnehlab, 2008) es similar al de *Automatic composition of music by means of Grammatical Evolution* (Ortega y Alfonseca, 2007) con la diferencia de que en el anterior basan su función de *fitness* directamente del procesador AP440 y en este trabajo, la función de *fitness* es dada por las gramáticas de Kohonen, en donde dada una profundidad de notas, se genera una nueva nota. Es decir, dados  $AB \rightarrow C$  o  $ABC \rightarrow A$  en donde el primer ejemplo tiene una profundidad de 3 y el siguiente de 4. Utilizando esto para aprender patrones.

La arquitectura de su sistema está basada en dos partes, una para la población de las notas y otra para la duración de las mismas, es un proceso paralelo.

Población de notas iniciales

```
→ iteración {  
  Población de notas  
  → población de notas previas + población de notas mutadas  
  → notas previas + notas mutadas + población de notas cruzadas  
  → Selección idónea usando la gramática de Kohoner  
}
```

⇔ Población de tiempos iniciales

```
→ iteración {  
  Población de tiempos  
  → población de tiempos previos + población de tiempos mutados  
  → tiempos previos + tiempos mutados + población de tiempos  
  cruzados
```

→ Selección idónea usando la gramática de Kohoner  
}

Únicamente usan 5 tipos de duración de tiempos. Usando solo tiempos de 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2 y 4. Usando operadores como -20 para conectar notas, -30 para separar notas y -40 para dar el finar de una barra, generan otros tiempos y duraciones de notas.

### ***Puntos fuertes o aportaciones***

Proponen dos maneras de evaluar los resultados. Uno basado en reglas y otro basado en aprendizaje utilizando la misma gramática de Kohonen para aprender términos cortos y largos en la música.

### ***Puntos débiles***

Le dan un brinco al problema de convergencia reiniciando la población inicial cada 10 generaciones.

Los autores no dan una estructura de cómo aprende los patrones con la gramática de Kohoner.

Utilizan el tono y el tiempo por separado para generar dos nuevas poblaciones y concatenarlas al final, me parece que rompe con la ligadura de una nota con su tiempo para su evaluación posterior.

### **2.1.5 Redes neuronales**

En el artículo *Composición musical vía computación neuronal* (Hilera *et al.*, 1998), realizaron un sistema para la edición y audición de partituras para la composición musical. Generaron un subsistema de inspiración musical, que consta de dos fases: una fase de aprendizaje, en donde el sistema procesa qué nota sigue después de cada  $n$  notas consecutivas en cada una de las melodías de un repertorio almacenado en el sistema, la otra fase es de generación, en donde dadas  $n$  notas por el usuario, el sistema genera la primera nota de la nueva melodía, luego se elimina la primera nota dada y se toma la última para generar la siguiente.

### ***Puntos fuertes***

Todo es parametrizable. Es decir, el usuario puede definir la profundidad para las neuronas de entrada, las neuronas ocultas, nivel de error y nivel de azar para evitar plagios y que no se generen las mismas estructuras.

### ***Trabajo no realizado***

Los autores no dan una manera de evaluar el resultado generado.

## **2.2 Autores relevantes y sus aportaciones**

**Joseph Schillinger.** Intentó desarrollar una teoría musical que pudiese ser útil con cerebros electrónicos.

**Lejaren Hiller y Leonard Isaacson.** En 1955 iniciaron sus trabajos de música algorítmica (Hiller e Isaacson, 1957,1958), basados en el modelo de generación y prueba. Crearon la que se considera la primera composición hecha completamente por una computadora. Fue publicado como “Illiac Suite”. Se basaron en cadenas de Markov para generar una nota pseudo-aleatoria dada una secuencia de  $n$  notas previas que pase una serie de pruebas heurísticas. Excluyen todo lo relacionado con la expresividad y el contenido emocional de la música.

**David Cope.** Desarrolló un sistema que genera música a partir del análisis de música establecida (Cope, 1991, 1993, 2001). Su sistema emula composiciones de diferentes compositores clásicos. Su sistema es basado en corpus en lugar de basado en reglas, de esta forma extrae el conocimiento de composiciones ya hechas al igual que en aproximaciones basadas en CBR.

**Michael Chan.** Su trabajo está fuertemente basado en los trabajos de David Cope por un lado y de Lerdahl and Jackendoff por el otro. Acepta un corpus de piezas musicales representadas en XML, produce nuevas obras imitando su estilo (Chan y Potter, 2006).

**Karsten Verbeurgt, Mikhail Dinolfo, y Michael Fayer.** Usaron modelos de Markov como un medio para la composición, aprendiendo probabilidades de transición entre los patrones.

**Charles Ames.** Propuso tratar con cadenas de Markov en diferentes tamaños de notas.

**Jon Gillick, Kevin Tang y Robert M. Keller.** Utilizan cadenas de Markov para determinar las probabilidades de transición entre grupos de diferentes tipos de temas melódicos.

**Terry A. Winograd.** Realiza un estudio basado en la gramática sistemática de Halliday. Lleva a cabo el análisis armónico de una pieza, etiquetando acordes, constituyendo uno de los primeros sistemas de análisis eficaz (Winograd, 1968).

**Gary M. Rader.** Utiliza gramáticas probabilísticas para generar melodías tradicionales. Utiliza técnicas propias de la Inteligencia Artificial. Utiliza reglas de aplicabilidad que determinan cuando se deben de utilizar las reglas generativas. Es el primer ejemplo de meta-conocimiento en este contexto (Rader, 1973, 1996).

**John McCormack.** Propuso el uso de L-systems y cadenas de Markov con gramáticas de derivación paralela (McCormack 1996).

**Gerard Assayag y Shlomo Dubnov.** Demostraron la posibilidad de usar oráculos como factor para generar secuencias musicales improvisadas.

**Fred Lerdahl y Ray Jackendoff.** Intentaron formalizar la teoría musical trabajando sobre lo propuesto por Schenker. Utilizan una teoría de gramáticas generativas para el análisis de la música (Lerdahl y Jackendoff, 1983).

**Damon Horowitz.** Utiliza una teoría de la gramática generativa como una aproximación al análisis de jazz (Horowitz, 1994).

**Mark Jerome Steedman.** Describió el uso de una gramática para el análisis de las progresiones de acordes de jazz, pero no melodías. Sus gramáticas fueron expresadas en términos de seis reglas re-escribibles tomando como entrada una progresión básica de blues (Steedman, 1984). Él dedujo las reglas del análisis del corpus de ocho progresiones de blues tomadas de un libro de Coker (Coker, 1987).

**Philip Johnson-Laird.** Describió el uso de una gramática para el análisis de melodías. También sugiere el uso de gramáticas regulares para explicar las secuencias rítmicas. Argumentan que la música es una excelente prueba para las teorías de creatividad por que aborda los problemas de semántica.

**John A. Biles.** Propone el uso de algoritmos genéticos interactivos y redes neuronales, con lo que se puede tocar Jazz con humanos (Biles, 1994).

**George Papadopoulos y Geraint Wiggins.** Utilizan algoritmos genéticos, por lo que requiere una función de fitness para realizar la selección genética (Papadopoulos y Wiggins, 1990).

**Heinrich Schenker.** Definió un sistema transformacional para el análisis musical mucho antes que Chomsky hiciera lo mismo para lingüística. Su método era en esencia analítico, no generativo.

**Andrew Gartland-Jones.** Usa Algoritmos genéticos que obtienen su fitness de música similar.

**Marques, Oliveira, Vieira y Rosa.** Utilizan algoritmos genéticos con funciones de fitness basadas en reglas (Marques *et al.*, 2000).

**Teuvo Kohonen.** Usa un contexto de expansión dinámica para el aprendizaje de patrones deterministas en la música (Kohonen, 1989).

**D. Burr y Y. Miyata.** Aplicaron un tipo de redes neurales recurrentes jerarquizadas para aprender escalas musicales.

**Mozer and Soukup.** Usaron una red neural recurrente para aprender melodías de Bach.

**F. Pereira, C. Grilo, L. Macedo, A. Cardoso.** Le dan un enfoque Case-Based Reasoning a su trabajo. Adoptando un proceso de composición progresivo e iterativo de derecha-izquierda y de arriba-abajo.

**Pierre Barbaud.** En 1958 intentó crear un sistema generativo para música tonal, a partir de las directrices que Kirker estableciera trescientos años antes.

**Simon and Summer.** Pioneros en Inteligencia Artificial. Intentan explicar los patrones de la música tonal en términos de ritmo, melodía, armonía y forma. Diseñan un método inductivo para identificar patrones. En base a estudios en psicología realizados en la misma universidad que trabajaron. Suele fecharse en 1968 el inicio de la investigación moderna en inteligencia artificial musical.

**S. Smoliar.** En 1971 implementó en LISP arias de las ideas de Schenker y consiguió generar polifonía medieval, canto gregoriano y contrapunto a la “Bach”

**E. Bilotta, P. Pantano, V. Talarico.** Propusieron la utilización de autómatas celulares.

**Z. Michalewicz and D. Fogel.** Utilización de Algoritmos genéticos con un trabajo excelente en heurística.

**Duff, Eberhart y Dobbins.** Propusieron en 1989 y 1990 la posibilidad de utilizar una red neuronal de tipo backpropagation. Para la combinación de diferentes melodías.

**J. R. Hilera, R. J. González, J. A. Gutiérrez de Mesa.** Proponen el uso de redes neuronales para la composición musical vía computación neuronal, creando un sistema de inspiración neuronal

**Miranda.** Discute diferentes enfoques para usar la computación evolutiva en música (McAlpine *et al.*, 1999).

**Gary Moore.** Su trabajo se basa en generación de melodías que intenta simular las técnicas usadas por humanos de forma más bien algorítmica y asado en técnicas heurísticas. Moore da una revisión de los métodos fractales y estocástico, orientados en procedimientos y composiciones recursivas.

**Marvin Minsky.** Propone el uso de agentes de manera que la iteración entre varios de ellos produzca el resultado esperado. Cada uno especializado en determinada habilidad o técnica, teniéndose a su vez agentes de orden superior que coordinan el funcionamiento global (Minsky, 1993).

**Jamshed Bharucha.** Usa redes neuronales para aprender armonía musical.

**Feulner.** Usa una combinación de técnicas de satisfacción de restricciones y redes neuronales.

**Sabater, Arcos y López de Mántara.** Proponen un sistema de armonización musical CBR y asistido por reglas (Arcos *et al.*, 1998).

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordan las definiciones y conceptos básicos necesarios para poder detallar la metodología para resolver el problema, la manera en la que se representan las reglas de producción definidas en este trabajo y el formato de salida con el que se presentan los resultados.

#### 3.1 Teoría musical

Para comprender los términos y relaciones entre los elementos que conforman una composición musical, se presenta un breve espacio de teoría.

##### 3.1.1 El sonido

El sonido es el fenómeno físico que da la razón a la música ya que ésta es la manipulación intencional de este fenómeno para crear estructuras sonoras que sean agradables para el oído.

###### 3.1.1.1 Definición de sonido

El sonido es la sensación percibida por el oído al recibir las variaciones de presión generadas por el movimiento vibratorio de los cuerpos sonoros. Se transmite por el medio que los envuelve.

El sonido tiene cuatro parámetros fundamentales:

- **Altura:** Es la cantidad de ciclos de las vibraciones por segundo de un cuerpo sonoro, es decir, hercios (Hz) que se emiten. De acuerdo con esto se pueden definir los sonidos como "graves" y "agudos". Cuanto mayor sea la frecuencia, más agudo será el sonido. La longitud de onda es la distancia medida en la dirección de propagación de la onda, entre dos puntos cuyo estado de movimiento es idéntico; es decir, que alcanzan sus máximos y mínimos en el mismo instante.

- **Duración:** Corresponde al intervalo de tiempo de las vibraciones que producen un sonido.
- **Intensidad:** Es la fuerza con la que se produce un sonido; depende de la energía. La intensidad viene representada en una onda por la amplitud.
- **Timbre:** Es la cualidad que permite distinguir los diferentes instrumentos o voces a pesar de que estén produciendo sonidos con la misma altura, duración e intensidad. Los sonidos que escuchamos son complejos; es decir, son el resultado de la suma diferentes frecuencias pero que nosotros percibimos como uno. El timbre depende de la cantidad de armónicos o la forma de la onda que tenga un sonido y de la intensidad de cada uno de ellos, a lo cual se lo denomina espectro.

#### **3.1.1.2 El ruido**

Es un sonido simple o complejo pero disarmónico y de muy alta intensidad, generando intolerancia o dolor al oído y una sensación de displacer al individuo, es decir, es la sensación auditiva inarticulada generalmente desagradable.

En el medio ambiente, se define como todo lo molesto para el oído. Desde ese punto de vista, la más excelsa música puede ser calificada como ruido por aquella persona que en cierto momento no desee oírla.

#### **3.1.1.3 El silencio**

El silencio es la ausencia perceptible de sonido, aunque es una sensación relativa, ya que el silencio absoluto no está presente en la naturaleza.

### **3.1.2 La música**

La definición del lenguaje musical es importante para poder estructurar las jerarquías y dependencias en la sintaxis de las gramáticas básicas que compondrán el sistema de generación.

#### **3.1.2.1 Definición de música**

La música es, según la definición tradicional del término, el arte de organizar sensible y lógicamente una combinación coherente de sonidos y silencios utilizando los

principios fundamentales de la melodía, la armonía y el ritmo, mediante la intervención de complejos procesos psico-anímicos. Desde hace varias décadas se ha vuelto más compleja la definición de qué es y qué no es la música, ya que destacados compositores, en el marco de diversas experiencias artísticas fronterizas, han realizado obras que, si bien podrían considerarse musicales, expanden los límites de la definición de este arte.

La música, como toda manifestación artística, es un producto cultural. El fin de este arte es suscitar una experiencia estética en el oyente, y expresar sentimientos, circunstancias, pensamientos o ideas. La música es un estímulo que afecta el campo perceptivo del individuo; así, el flujo sonoro puede cumplir con variadas funciones como para el entretenimiento, la comunicación, la ambientación, etc.

### **3.1.2.2 Elementos de la música**

La organización coherente de los sonidos y los silencios nos da los parámetros fundamentales de la música, que son la melodía, la armonía la métrica y el ritmo. La manera en la que se definen y aplican estos principios, varían de una cultura a otra y variaciones temporales.

- **La melodía** es un conjunto de sonidos que suenan sucesivamente uno después de otro, y que se percibe con identidad y sentido propio. También los silencios forman parte de la estructura de la melodía, poniendo pausas al discurso melódico. El resultado es como una frase bien construida semántica y gramaticalmente. Es discutible si una secuencia dodecafónica podría ser considerada una melodía o no. Cuando hay dos o más melodías simultáneas se denomina contrapunto.
- **La armonía** regula la concordancia entre sonidos que suenan simultáneamente y su enlace con sonidos vecinos. Su unidad básica es el acorde.
- **El ritmo** se refiere a la pauta de repetición a intervalos regulares, y en ciertas ocasiones irregulares, de sonidos fuertes o débiles y silencios en una composición.

- **El estilo** es el resultado final de los elementos anteriores, a veces con variaciones muy notorias, pero en una muy general apreciación se trata de la capacidad de generar contraste en la música, esto es provocado por las diferentes dinámicas, timbres, texturas y sonidos.

### 3.1.2.3 Las notas

En el ámbito de la música, el término nota se refiere a un sonido determinado por una vibración cuya frecuencia fundamental es constante.

Los nombres de las notas musicales se derivan del poema “*Ut queant laxis*” del monje benedictino friulano Pablo el Diácono, específicamente de las sílabas iniciales del himno a San Juan Bautista.

Luego de las reformas y modificaciones llevadas a cabo en el siglo XVI, las notas pasaron a ser las que se conocen actualmente en el sistema occidental: *Do, Re, Mi, Fa, Sol, La* y *Si*.

Los cifrados más comunes de las notas en diferentes sistemas son las siguientes:

Sistema	Representación
Inglés	C D E F G A B
Alemán	C D E F G A H
Español e italiano	Do Re Mi Fa Sol La Si
Francés	Ut Re Mi Fa Sol La Si

Aunque en el sistema francés se respeta la primera sílaba del poema de San Juan, para el solfeo se sigue utilizando *Do* para eliminar la dificultad de pronunciación que produce la letra *t*.

### 3.1.3 Escritura musical

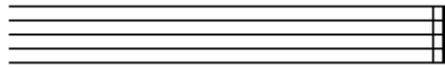
Existen diversas formas de escritura musical en diferentes culturas, pero en lo que respecta a la música occidental, es a partir de la música de la Edad Media que se comenzó a emplear el sistema de notación musical que evolucionaría al actual. En el Renacimiento cristalizó con los rasgos más o menos definitivos con que lo conocemos

hoy, aunque como todo lenguaje, ha ido variando según las necesidades expresivas de los usuarios.

El sistema se basa en dos ejes: uno horizontal, que representa gráficamente el transcurrir del tiempo, y otro vertical que representa gráficamente la altura del sonido.

### **3.1.3.1 El pentagrama**

Las alturas se leen en relación a un pentagrama que es un conjunto de cinco líneas y cuatro espacios paralelos y enumerados de abajo hacia arriba, de tal manera que la línea inferior es la primera línea y el espacio entre la primera y la segunda línea es el primer espacio. Es la base de referencia para la colocación de símbolos musicales.



**Ilustración 5. Representación del pentagrama**

El final de un pentagrama es representado por una línea vertical delgada seguida de una línea gruesa paralela a ésta.

### **3.1.3.2 La clave**

Al comienzo de cada pentagrama se coloca una "clave" que tiene la función de atribuir a una de las líneas del pentagrama una determinada nota musical. En un pentagrama encabezado por la clave de *Sol* en segunda línea nosotros leeremos como *Sol* el sonido que se escribe en la segunda línea, las notas ascendentes y descendientes se escriben en los espacios y líneas próximas siguientes respectivamente. Para los sonidos que quedan fuera de la clave se escriben líneas adicionales. Las claves más usadas son las de *Do* en la tercera línea, esta clave toma como referencia al *Do* de 261.63 Hz, es decir, el *Do* central del piano. La clave de *Sol* en segunda, que se refiere al *Sol* que está una quinta por encima del *Do* central, y la de *Fa* en la cuarta línea, referida al *Fa* que está una quinta por debajo del *Do* central.



Ilustración 6. Forma y posición de las claves sobre el pentagrama

### 3.1.3.3 Las figuras musicales

Para escribir la duración de los sonidos se utiliza un sistema de figuras que representan duraciones relativas entre sí, los nombres de las figuras y su duración se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Figuras musicales

Figura	Nombre	Duración	Valor
	Redonda	1	Dos veces una blanca
	Blanca	2	Mitad de una redonda y dos veces una negra
	Negra	4	Mitad de una blanca y dos veces una corchea
	Corchea	8	Mitad de una negra y dos veces una semicorchea
	Semicorchea	16	Mitad de una corchea y dos veces una fusa
	Fusa	32	Mitad de una semicorchea y dos veces una semifusa
	Semifusa	64	Mitad de una semifusa

Cuando escribimos corcheas, semicorcheas, fusas y semifusas acostumbramos a agrupar el corchete de todas las que queden dentro de un tiempo para facilitar la lectura.



Ilustración 7. Notas con uniones

Las figuras son duraciones relativas; la figura que corresponde a la unidad de tiempo es representada por el número inferior de la indicación de compás.

### 3.1.3.4 El compás

Los compases son unidades iguales de tiempo con el que se divide el discurso musical representadas por el intervalo de notas que caben entre dos líneas verticales. Cada línea vertical que atraviesa el pentagrama marca el final de un compás y el comienzo del siguiente.

### 3.1.3.5 La indicación de compás

Al comienzo del pentagrama habrá una fracción con dos números; el número de arriba indica la cantidad de tiempos que tiene cada compás; el número de abajo nos indica cuál será la unidad de tiempo.

Así, una partitura encabezada por un  $3/4$  estará dividida en compases con duración de tres negras, seis corcheas, una negra y cuatro corcheas o cualquier representación con una duración equivalente.

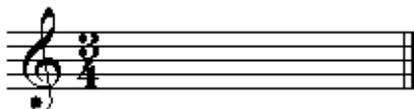


Ilustración 8. Indicación de compás

Frecuentemente utilizamos los símbolos  $\text{C}$  para compases de  $4/4$  y  $\text{C}$  para el compás de  $2/2$ .

En el siguiente ejemplo vemos una partitura con una indicación de compás de dos tiempos donde cada tiempo es ocupado por una negra.



Ilustración 9. Ejemplo de la indicación de compás

### 3.1.3.6 Los silencios

Los silencios son representados por otros signos definidos que corresponden a cada una de las figuras de tiempo.

**Tabla 3. Correspondencia de silencios y figuras**

Símbolo	Figura
	Redonda
	Blanca
	Negra
	Corchea
	Semicorchea
	Fusa
	Semifusa

Como se ve, las duraciones están establecidas según una relación binaria (doble o mitad), lo que no prevé la subdivisión por tres, que será indicada con tresillos.

Cuando se desea que a una nota o silencio se le agregue la mitad de su duración, se le coloca un punto a la derecha (puntillo).

**Tabla 4. Comparación de tiempos con y sin puntillo**

Con puntillo		Sin puntillo	
Figura	Equivalencia	Figura	Equivalencia
			
			
			

Cuando se desea que la nota dure, además de su valor, otro determinado valor, se escriben dos notas y se las une por medio de una línea arqueada llamada ligadura de prolongación.

En el siguiente ejemplo el primer compás usa ligadura de prolongación y en el segundo se ocupa el puntillo, los dos compases son equivalentes.



Ilustración 10. Compases con ligadura y puntillo

### 3.1.3.7 Las alteraciones

Cualquiera de las siete notas se puede alterar de forma ascendente o descendente por medio de las alteraciones.

Los símbolos que representan las alteraciones se muestran en la tabla 5.

En la escritura musical una alteración afecta cualquier nota del mismo nombre y en la misma octava dentro de un compás.

### 3.1.3.8 Las armaduras de clave

Para reducir el número de alteraciones al momento de escribir la música recurrimos al uso de armaduras de clave. Estas alteraciones, escritas entre la clave y la indicación de compás afectan a todas las notas de ese nombre a través de la pieza incluyendo aquellas en otras octavas.

Tabla 5. Símbolo y función de las alteraciones

Figura	Nombre	Función
#	Sostenido	Aumenta un semitono la nota siguiente durante el resto del compás
b	Bemol	Disminuye un semitono la nota siguiente durante el resto del compás
□	Becuadro	Anula el efecto de las alteraciones en esa nota desde ese punto en adelante

### **3.1.3.9 Notaciones adicionales**

En general, las incapacidades del sistema se resuelven utilizando palabras escritas más o menos convencionales, generalmente en italiano. Así, por ejemplo, las intensidades se indican mediante el uso de una *f* (*forte*, fuerte) o una *p* (*piano*, suave), o repeticiones de cada una para indicar más o menos intensidad. La velocidad de los pulsos se indica con palabras al comienzo de la partitura que son, en orden de velocidad: *largo*, *lento*, *adagio*, *moderato*, *andante*, *allegro*, *presto*.

### **3.1.4 Relación entre las notas**

Un oído sano y joven es sensible a las frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20 kHz. No obstante, este margen varía según cada persona y se altera con la edad. Este rango equivale muy aproximadamente a diez octavas completas.

En el sistema musical occidental, se ha acordado utilizar sólo unas frecuencias concretas, a las cuales llamamos notas.

Dividimos las posibles frecuencias en porciones que llamamos octavas, y cada octava en 12 porciones que llamamos notas. Cada nota de una octava tiene exactamente la mitad de frecuencia que la misma nota en la octava superior.

#### **3.1.4.1 Tono y semitono**

. Un semitono es la distancia o diferencia en frecuencia sonora entre cada uno de los sonidos de la octava, que en el sistema de afinación temperado se divide equitativamente en doce sonidos

Es considerado el menor de los dos intervalos que se pueden producir entre notas consecutivas de una escala diatónica. Recibe su nombre del hecho de ser igual a la mitad del tono en una escala temperada, que es el mayor de estos intervalos entre notas consecutivas de una escala.

Un cent equivale a una centésima de semitono temperado, por lo que un tono equivale a 200 cents.

Dada esta división equitativa de frecuencias, se consigue una constante de proporcionalidad geométrica igual a la raíz 12 de 2, esto es:

$$K12 = \sqrt[12]{2}$$

Una buena aproximación para el cálculo de las frecuencias de las notas es considerar cuatro decimales y tomar K12 como 1.0595 a pesar de que es un mal momento, pero se toma como estándar porque el error es de 0.06 cents para multiplicaciones simples. El error se acumula cada vez que se hace esta operación, si se efectúan multiplicaciones encadenadas. Sin embargo, efectuando un encadenamiento de doce semitonos redondeados de esta forma, la diferencia con el intervalo de octava aún es menor de un cent.

### **3.1.5 La afinación**

La nota *La* sirve como referencia para todas las demás. Se produce un *La* de afinar o *La 440* cuando el aire vibra 440 veces por segundo, es decir a 440 Hz. Por convención, se suele considerar que esta nota *La* pertenece a la tercera octava, dando al *Do* de esta el nombre de *Do central*.

#### **3.1.5.1 La escala cromática**

La escala cromática, también llamada escala dodecáfona o duodécuple, es la escala que contiene los doce semitonos de la escala temperada occidental.

Cada nota está separada de sus vecinas superior e inferior por el intervalo de un semitono. El término "cromático" es comprendido por los músicos para referirse a la música que incluye las notas que no son parte de la escala principal, y también como palabra descriptiva para esas notas particulares no diatónicas.

La sucesión de notas utilizada en esta escala está dada por las siete notas fundamentales de la escala diatónica natural que reciben los nombres definidos anteriormente y agregando una alteración para las notas intermedias de la siguiente forma.

Tabla 6. Nombres de las notas de la escala cromática

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Do#		Re#			Fa#		Sol#		La#	
	Reb		Mib			Solb		Lab		Sib	
Do		Re		Mi	Fa		Sol		La		Si

### 3.1.5.2 Enarmonía

Se llama notas enarmónicas a dos notas de nombre diferente pero de misma frecuencia sonora. Por ejemplo **Sol#** y **Lab** son notas enarmónicas porque las dos tienen una frecuencia de 415.305 Hz para una afinación en **La 440**.

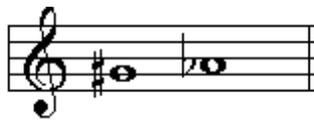


Ilustración 11. Enarmonía de Sol# y Lab

### 3.1.6 Los intervallos

Intervallo es la diferencia de frecuencias entre dos notas musicales, medida cuantitativamente en grados o notas naturales y cualitativamente en tonos y semitonos.

#### 3.1.6.1 Nombres de los intervallos

Contando el número de grados entre las notas obtenemos el nombre del intervalo. Al contar los grados debemos incluir tanto la primera como la última nota. Sin embargo, no todos los intervallos del mismo nombre tienen el mismo tamaño. Por esto es necesario especificar la especie o calificación de los intervallos determinando con exactitud el número de tonos y semitonos que tiene.

#### 3.1.6.2 Clasificación de los intervallos

En la escala cromática podemos observar que no todos los intervallos de una nota a otra tienen el mismo número de tonos y semitonos, por ejemplo, la segunda entre *Do* y *Re* tiene un tono, mientras que entre *Mi* y *Fa* hay un semitono.

Debido a estas diferencias es necesario especificar la especie o clasificación de los intervallos.

- **Intervalos tonales.** Son aquellos intervalos que tienen un solo valor justo, dentro de estos intervalos están el intervalo de cuarta, de quinta y de octava. El intervalo de primera, que en realidad es el unísono de la misma nota, también entra en esta categoría.
- **Intervalos modales.** Son los intervalos que tienen un valor mayor y otro menor propios de la modalidad en que se encuentra. Dentro de estos intervalos están los de segunda, tercera, sexta y séptima.

Todos los intervalos pueden ser aumentados o disminuidos. En la tabla 7 se da la clasificación según los semitonos.

### **3.1.6.3 Consonancias y disonancias**

Los intervalos son clasificados como consonantes o disonantes de acuerdo a la complejidad de la relación matemática de la frecuencia sonora de las notas que lo componen.

A pesar de que a través de la historia el concepto de consonancia y disonancia ha variado e incluso hoy día los teóricos no siempre concuerdan, podemos ofrecer la siguiente clasificación.

**Tabla 7. Nombre, clasificación y distancia entre intervalos**

<b>Intervalo</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Semitonos</b>
Primera	Unísono	0
Segunda	Disminuida	0
	Menor	1
	Mayor	2
	Aumentada	3
Tercera	Disminuida	2
	Menor	3
	Mayor	4
	Aumentada	5
Cuarta	Disminuida	4
	Justa	5
	Aumentada	6
Quinta	Disminuida	6
	Justa	7
	Aumentada	8
Sexta	Disminuida	7
	Menor	8
	Mayor	9
	Aumentada	10
Séptima	Disminuida	9
	Menor	10
	Mayor	11
	Aumentada	12
Octava	Disminuida	11
	Justa	12
	Aumentada	13

- *Consonancias perfectas*: los intervalos de cuarta, quinta y octava cuando son justas.
- *Consonancias imperfectas*: los intervalos de tercera y sexta ya sean mayores o menores.
- *Disonancias absolutas*: los intervalos de segunda y séptima mayores y menores.
- *Disonancias condicionales*: todos los intervalos aumentados y disminuidos, excepto la cuarta aumentada y la quinta disminuida.
- *Semiconsonancias*: la cuarta aumentada y la quinta disminuida.

Además, en el contexto de la armonía tradicional, el intervalo melódico de cuarta aumentada es considerado disonante.

#### **3.1.6.4 Intervalos compuestos y simples**

Intervalos simples son aquellos que no son mayores a una octava. Intervalos compuestos son aquellos que sobrepasan la octava.

La novena, décima, undécima y decimotercera son ejemplos de intervalos compuestos.

#### **3.1.6.5 Intervalos melódicos y armónicos**

Un intervalo armónico es aquel en que las notas se tocan simultáneamente. En los intervalos melódicos las notas se tocan en forma sucesiva.



**Ilustración 12. Diferencia entre intervalo melódico y armónico**

#### **3.1.6.6 Relación matemática de los intervalos**

El *La* que está en la octava del *Do* central tiene 440Hz. Un *La* una octava más aguda vibra a 880Hz. teniendo exactamente el doble de vibraciones por segundo. Esta

relación se expresa matemáticamente como 880:440 ó 2:1. En la tabla 8 se dan las relaciones matemáticas de algunos intervalos organizados de consonantes a disonantes.

### 3.1.7 Escalas

Se llama escala musical a la sucesión ordenada consecutivamente de todas las notas, estos sonidos están dispuestos de forma ascendente, es decir de grave a agudo, aunque complementariamente también de forma descendente, uno a uno en posiciones específicas dentro de la escala, llamadas grados.

**Tabla 8. Relación entre intervalos**

<b>Relación</b>	<b>Intervalo</b>
2:1	Octava
3:2	Quinta
4:3	Cuarta
5:4	Tercera mayor
6:5	Tercera menor
9:8	Segunda mayor
16:15	Segunda menor

La utilidad práctica de la escala musical es fundamentalmente didáctica, y permite sintetizar la composición particular de un sistema musical, como también exponer de manera simplificada, esquemática y conveniente el material melódico y armónico del que está compuesta, en parte o en totalidad, una obra musical sometida a estudio.

Damos el nombre de grados a cada una de sus notas y los representamos con números romanos.

Las dos características que distinguen una escala de otra son:

- El número de notas que existen en el intervalo de una octava.
- El orden de los intervalos que existen entre cada uno de sus grados.

Existen muchas escalas ya definidas, pero también se pueden inventar escalas al momento de componer. Compositores como Claude Debussy, Olivier Messiaen y Bela Bartok, entre otros, lo han hecho en el pasado reciente.

Las escalas más utilizadas en la música occidental actual son dos, la escala mayor y la escala menor.

### 3.1.7.1 Escala mayor

La escala mayor es la sucesión armónica más natural que existe, está fundamentalmente definida por los armónicos que la compone en sus relaciones más básicas ya anteriormente estudiadas.

La estructura para una escala mayor comenzando por la nota fundamental está dada por la tabla 9.

**Tabla 9. Estructura de la escala mayor**

Grados	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII
Distancia	0	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono	Tono	Semitono
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Mayor	Octava Mayor

Se puede construir una escala comenzando en cualquier nota usando alteraciones para mantener el orden de tonos y semitonos. Por ejemplo, para construir una escala mayor sobre la nota *Re*, debemos alterar las notas *Fa* y *Do*:

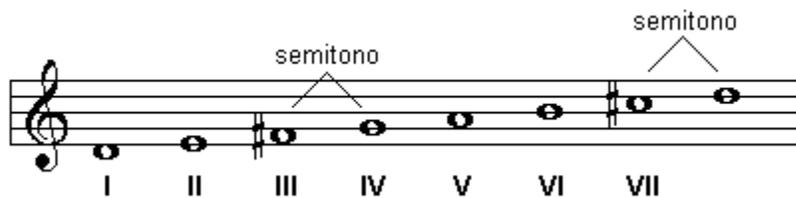


Ilustración 13. Representación de la escala de Re Mayor

Para referirnos a una escala en particular, le damos el nombre de la nota sobre la que se construye y especificamos su estructura. Para el ejemplo anterior se usa el nombre de *Re Mayor*.

### 3.1.7.2 Escalas menores

Al igual que la escala mayor, la escala menor tiene 7 notas. Sin embargo existen tres variedades: menor natural, menor armónica y menor melódica. La diferencia entre estos tres tipos de escala es la alteración de los grados VI y VII.

#### **Escala menor natural**

La escala mayor tiene una escala menor asociada que tiene las mismas notas que la escala mayor y que dista VI grados de la nota mayor origen. Es la escala relativa menor.

Esta escala se crea a partir de los intervalos resultantes de recorrer la nota de origen VI grados, ver tabla 10.

**Tabla 10. Estructura de la escala menor natural**

<b>Grados</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
Distancia	0	Tono	Semitono	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Menor	Séptima Menor	Octava Justa

#### **Escala menor armónica**

El nombre se debe a que una de las razones para la alteración del VII grado es de índole armónica. Alterar esta nota permite la formación del acorde de dominante o séptima dominante sobre el V grado de la escala. Su estructura está definida en la tabla 11.

**Tabla 11. Estructura de la escala menor armónica**

<b>Grados</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
Distancia	0	Tono	Semitono	Tono	Tono	Semitono	3 Semitonos	Tono
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Menor	Séptima Mayor	Octava Justa

### 3.1.7.3 Las escalas pentatónicas

Las escalas pentatónicas son escalas de cinco sonidos. Estas escalas han sido muy utilizadas en la música folklórica de diferentes países. Más recientemente, compositores como Claude Debussy y Maurice Ravel la han utilizado en su música.

A pesar de que cualquier escala de cinco sonidos podría llamarse pentatónica, las formas más comunes son la mayor y la menor.

### 3.1.7.4 La escala pentatónica mayor

La escala pentatónica mayor está basada en la escala mayor, pero excluyendo los grados IV y VII de esta, creando así la estructura mostrada en la tabla 12.

**Tabla 12. Estructura de la escala pentatónica mayor**

<b>Grados</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>
Distancia	0	Tono	Tono	3 semitonos	Tono	3 Semitonos
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Quinta Justa	Sexta Mayor	Octava Mayor

### 3.1.7.5 La escala pentatónica menor

Igual que la escala pentatónica mayor, esta se basa en la escala menor natural, pero excluyendo los grados II y VI de esta, la estructura resultante es la siguiente.

**Tabla 13. Estructura de la escala pentatónica menor**

<b>Grados</b>	<b>I</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
Distancia	0	3 Semitonos	Tono	Tono	3 semitonos	Tono
Intervalo	Primera	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Séptima Menor	Octava Justa

### 3.1.7.6 Los modos

Para adentrarnos en los modos diremos que son un conjunto de escalas construidas sobre cada uno de los grados de la escala mayor. Tienen su origen en los modos gregorianos. Se les llama modos gregorianos a las escalas o modos utilizados en el canto gregoriano. Éstos eran de carácter monofónico y estuvieron en uso durante la Edad Media y el Renacimiento. Con el tiempo se fueron transformando en nuestras escalas mayores y menores. El número de modos varía de acuerdo a la época, pero podríamos decir que existían ocho modos gregorianos.

Después de varios siglos de estar olvidados, estos modos se fueron variando y se han utilizado en todo tipo de músicas, tanto en la música clásica como en el Jazz. Aunque la nomenclatura y los nombres para referirse a ellos son diferentes en la actualidad los nombres más usados son los que se mencionan a continuación.

### Jónico

Este modo es el más natural y es del que deriva la escala mayor actual. La escala sin alteraciones es comenzando en *Do*. Ver Tabla 14.

Tabla 14. Estructura del modo jónico

Grados	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII
Distancia	0	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono	Tono	Semitono
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Mayor	Octava Mayor

### Dórico

Debido a que su tercer grado es menor, se considera una escala menor pero con una sexta mayor. Su escala sin alteraciones es comenzando el *Re*. Ver Tabla 15.

Tabla 15. Estructura del modo dórico

Grados	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII
Distancia	0	Tono	Semitono	Tono	Tono	Tono	Semitono	Tono
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Menor	Octava Mayor

### Frigio

Es una escala menor con segunda menor. Su escala sin alteraciones es comenzando en *Mi*. Ver Tabla 16

Tabla 16. Estructura del modo frigio

Grados	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII
Distancia	0	Semitono	Tono	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono
Intervalo	Primera	Segunda Menor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Menor	Séptima Menor	Octava Mayor

### Lidio

Esta es una escala mayor con el cuarto grado aumentado. La escala sin alteraciones es la de *Fa*. Ver Tabla 17.

Tabla 17. Estructura del modo lidio

Grados	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII
Distancia	0	Tono	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono	Semitono

Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Aumentada	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Mayor	Octava Mayor
-----------	---------	---------------	---------------	------------------	--------------	-------------	---------------	--------------

### **Mixolidio**

Es una escala mayor con séptima menor. Es la tercera más conocida de los modos después del jónico que deriva a la escala mayor y el eólico que deriva al menor. La escala de este modo que no contiene alteraciones inicia en *Sol*.

**Tabla 18. Estructura del modo mixolidio**

<b>Grados</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VII</b>
Distancia	0	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono	Semitono	Tono
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Menor	Octava Mayor

### **Eólico**

Este modo es del que deriva la escala menor natural. Su escala sin alteraciones es *La*.

**Tabla 19. Estructura del modo eólico**

<b>Grados</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
Distancia	0	Tono	Semitono	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono
Intervalo	Primera	Segunda Mayor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Menor	Séptima Menor	Octava Justa

### **Locrio**

Es una escala menor con segunda menor quinta disminuida. La escala sin alteraciones es comenzando en *Si*. Es una escala disminuida porque al medir la quinta desde la tónica es una quinta disminuida. Es la escala más inestable de todas.

**Tabla 20. Estructura del modo locrio**

<b>Grados</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VII</b>
Distancia	0	Semitono	Tono	Tono	Semitono	Tono	Tono	Tono
Intervalo	Primera	Segunda Menor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Disminuida	Sexta Menor	Séptima Menor	Octava Mayor

#### **3.1.7.7 Nombres de los grados**

Hasta este punto se han utilizado los números romanos para especificar los grados de una escala dada, es decir, la posición que ocupan en la sucesión. En adelante y para el

análisis armónico, se usarán los grados para definir la posición de un acorde creado a partir de la posición de una nota y que cumple una función con respecto a esa escala. Estos grados además de ser representados por números romanos, tienen un nombre que define su función tonal dentro de un sistema especificado.

**Tabla 21. Nombre de los grados**

<b>Grado</b>	<b>Nombre</b>
<b>I</b>	Tónica
<b>II</b>	Supertónica
<b>III</b>	Mediante
<b>IV</b>	Subdominante
<b>V</b>	Dominante
<b>VI</b>	Superdominante
<b>VII</b>	Sensible

El **III** Grado es ambiguo. No podemos definirlo dentro de las tres funciones tonales básicas, Tónica, Sub-dominante y Dominante, ya que, para empezar, no tiene similitud alguna con el **IV** ni el **II** grado, entonces no es Sub-dominante. Y si bien, tiene coincidencias, en su composición con el **I**, no genera la sensación de reposo necesaria para encasillarlo en esta función Tónica. Lo mismo ocurre con el **V**, tiene dos coincidencias, pero no genera la tensión necesaria para ser considerado Dominante.

El **VII** es un grado un tanto especial, y no tiene función propia, ya que es el **V7** sin su fundamental, por lo que se le considera dominante.

### **3.1.7.8 La tonalidad**

El concepto de tonalidad va tomando forma durante el Renacimiento y se establece desde el período Barroco. Está relacionado al uso de las escalas mayores y menores.

Cuando construimos una obra usando una escala mayor o menor, la tónica de esta escala se convierte en el centro tonal. La pieza encuentra su reposo o descanso en esta nota. Decimos entonces, que estamos en la tonalidad relacionada a esta escala. Por ejemplo, si la escala fuera la de re mayor decimos que estamos en la tonalidad de re mayor.

En las obras musicales escritas en los períodos Barroco, Clásico y Romántico cuando hablamos de la tonalidad de una obra, queremos decir que ésta es la tonalidad principal. Sin embargo, se producen innumerables modulaciones, es decir, cambios momentáneos de tonalidad, a través de la obra.

Los acordes, muy especialmente los de séptima de dominante, y la armonía participan en la definición de la tonalidad y en los procesos de modulación.

### **3.1.8 Acordes**

En el sistema musical occidental, los acordes son muy importantes debido a que estos son utilizados para armonizar las melodías y dar el sentido tonal a las composiciones, es decir, le da estructura e impulso a la melodía.

Tres o más notas, tocadas simultáneamente forman un acorde. Tradicionalmente, los acordes se han construido sobreponiendo dos o más terceras. La nota que sirve de base para construir el acorde, recibe el nombre de fundamental y las demás notas que lo componen reciben el nombre del intervalo que forman con relación a la fundamental.

#### **3.1.8.1 Las inversiones**

Decimos que un acorde está en estado o posición fundamental si su fundamental es la nota más grave. En un acorde de tres sonidos o triada, podemos además disponer el acorde en primera o segunda inversión. Un acorde está en primera inversión cuando su tercera es la nota más grave. Está en segunda inversión cuando su quinta es la nota más grave.

El número de inversiones es directamente proporcional al número de notas del que esté formado.

#### **3.1.8.2 Las triadas**

Las triadas son acordes de tres sonidos a intervalo de tercera según la escala a la que correspondan, estos pueden ser mayores, menores, aumentadas o disminuidas.

Las triadas mayores y menores se consideran perfectas por tener siempre una quinta justa o perfecta. Las triadas disminuidas y aumentadas reciben su nombre por el tipo de quinta que tienen.

**Tabla 22. Tipos de triadas**

<b>Nombre</b>	<b>Tercera</b>	<b>Quinta</b>	<b>Descripción</b>
Mayor (Maj)	Mayor	Justa	En su estado fundamental cumple con una relación de tercera mayor con su primer intervalo y de quinta justa con su segundo intervalo.
Menor (min)	Menor	Justa	En su estado fundamental, cumplen con una relación de tercera menor con su primer intervalo y de quinta justa con su segundo intervalo.
Aumentado (Aug)	Menor	Aumentada	Para formar este tipo de acorde se ocupa un intervalo de tercera menor y de quinta aumentada con respecto a la fundamental. Toman el nombre del estado del intervalo de quinta.
Disminuido (Dim)	Mayor	Disminuida	Se forma por un intervalo de tercera mayor y otro de quinta aumentada.

### **3.1.8.3 Las cuatriadas**

Las cuatriadas son los acordes formados por cuatro notas superpuestas con intervalos definidos con respecto a su fundamental.

### **3.1.8.4 Los acordes de séptima**

Si añadimos una tercera a cualquier triada obtendremos un acorde de séptima. Damos este nombre debido al intervalo de séptima que se forma con relación a la fundamental.

Podemos formar acordes de séptima sobre cada uno de los grados de las escalas y modos que queramos utilizar. Para identificarlos, analizamos la triada y el intervalo de séptima que forman el acorde.

### **3.1.9 La armonía**

En la música occidental, la armonía es la subdisciplina que estudia el encadenamiento de diversas notas superpuestas; es decir: la organización de los acordes.

Tabla 23. Tipos de Cuatriadas

Nombre	Tercera	Quinta	Séptima	Descripción
Séptima Mayor (Maj7)	Mayor	Justa	Mayor	Este acorde corresponde con una triada Mayor con un intervalo de séptima Mayor superpuesta.
Séptima (7)	Mayor	Justa	Menor	Este acorde corresponde con una triada Mayor con un intervalo de séptima Menor superpuesta.
Séptima Menor (min7)	Menor	Justa	Mayor	Este acorde corresponde a las triadas Menores y una séptima Mayor.
Séptima Menor Dominante (Dom)	Menor	Justa	Menor	Igual que el anterior, se basa en una triada Menor pero con una séptima Menor.
Séptima Mayor Dominante (MajDom)	Mayor	Aumentada	Mayor	Este es acorde es la variante de una triada Aumentada con una séptima Mayor.
Séptima Aumentada (Aug7)	Mayor	Aumentada	Menor	También corresponde a una triada Aumentada, pero difiere del anterior porque en este el tercer intervalo corresponde a una séptima Menor.
Séptima Disminuida (Dim7)	Menor	Disminuida	Disminuida	Corresponde a una triada Disminuida con séptima Disminuida.
Séptima Semidisminuida (SemiDim)	Menor	Disminuida	Menor	Este tipo de acordes también usa la triada Disminuida pero con la sétima Menor.

### 3.1.9.1 Definición de armonía

Es la ciencia que enseña a constituir los acordes y que sugiere la forma de combinarlos en la manera más equilibrada, consiguiendo así sensaciones de relajación, sosiego con la armonía consonante, y de tensa e hiriente con la armonía disonante.

Esta definición se basa en la idea de que ciertos intervalos producen al oyente una sensación de tensión y otras producen una sensación de reposo o calma.

### 3.1.9.2 Las progresiones

La progresión armónica trata sobre el movimiento de los acordes de una pieza y sirven de base a la melodía musical. Puede pensarse en los acordes como en las columnas de una construcción y las melodías en los detalles que van soportados sobre dichas bases.

El movimiento de los acordes está basado en patrones o círculos armónicos típicos y en variaciones de estos que son dados bajo unas reglas básicas de conducción de voces y acordes sustitutos.

### 3.1.9.3 Armonización de las escalas

Cuando se construye una progresión de acordes a partir de las notas de una escala, se dice que se está armonizando dicha escala. Cada nota de la escala pertenece a un grado según su posición y su función tonal.

#### Progresión armónica de las escalas mayores

Los acordes que corresponden a una escala están formados por las triadas derivadas de tomar cada uno de sus grados como fundamental.

Para la construcción de los acordes, usaremos los grados definidos sobre la escala para crear intervalos de tercera y quinta para las triadas y de tercera, quinta y séptima para las cuatriadas.

En la Tabla 24 se puede ver como se forman las triadas en esta escala.

**Tabla 24. Triadas de las escalas mayores**

<b>Grado</b>	<b>Estructura</b>	<b>Intervalos</b>	<b>Acorde</b>
<b>I</b>	<b>I III V</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa	Mayor
<b>II</b>	<b>II IV VI</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Justa	Menor
<b>III</b>	<b>III V VII</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Justa	Menor
<b>IV</b>	<b>IV VI I</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa	Mayor
<b>V</b>	<b>V VII II</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa	Mayor
<b>VI</b>	<b>VI I III</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Justa	Menor
<b>VII</b>	<b>VII II IV</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Disminuida	Disminuida

En todas las escalas mayores, las triadas que se forman sobre los grados I, IV y V son mayores. Las que se forman sobre los grados II, III y VI son menores y disminuida la que se forma sobre el grado VII.

Es decir, la progresión armónica para la escala mayor en acordes de triadas es:

**I Maj – II min – III min – IV Maj – V Maj – VI min – VII Dim**

La tabla siguiente muestra la manera de crear las cuatriadas para esta escala.

**Tabla 25. Cuatriadas de las escalas mayores**

<b>Grado</b>	<b>Estructura</b>	<b>Intervalos</b>	<b>Acorde</b>
<b>I</b>	<b>I III V VII</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa – Séptima Mayor	Mayor
<b>II</b>	<b>II IV VI I</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>III</b>	<b>III V VII II</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>IV</b>	<b>IV VI I III</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa – Séptima Mayor	Séptima
<b>V</b>	<b>V VII II IV</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>VI</b>	<b>VI I III V</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>VII</b>	<b>VII II IV VI</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Dim – Séptima Menor	Semidisminuida

De lo anterior obtenemos la progresión armónica para la escala mayor en acordes de cuatriadas:

**I** Maj7 – **II** Dom – **III** Dom – **IV** Maj7 – **V**7 – **VI** Dom – **VII** SemiDim

### ***Progresión armónica de las escalas menores***

Debido a los tres tipos de escalas menores, natural, armónica y melódica, tenemos una mayor variedad de triadas en estas escalas.

En las escalas menores armónicas y melódicas encontramos dos tipos de séptimas para las que no tenemos nombres aceptados debido a su uso poco frecuente en la música tradicional. En estos casos utilizamos el tipo de triada e intervalo de séptima para identificarlas. Últimamente se ha utilizado el nombre de séptima aumentada para el acorde formado por una triada aumentada y una séptima mayor. Sin embargo la mayor parte de los tratados de armonía no han adoptado este término.

### ***Progresión armónica de las escalas menores naturales***

En la siguiente tabla se puede ver como se forman las triadas en esta escala.

**Tabla 26. Triadas de las escalas menores naturales**

<b>Grado</b>	<b>Estructura</b>	<b>Intervalos</b>	<b>Acorde</b>
<b>I</b>	<b>I III V</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa	Menor
<b>II</b>	<b>II IV VI</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Disminuida	Disminuida
<b>III</b>	<b>III V VII</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa	Mayor
<b>IV</b>	<b>IV VI I</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa	Menor
<b>V</b>	<b>V VII II</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa	Menor
<b>VI</b>	<b>VI I III</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa	Mayor
<b>VII</b>	<b>VII II IV</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa	Mayor

Es decir, la progresión armónica para la escala mayor en acordes de triadas es:

**I min – II Dim – III Maj – IV min – V min – VI Maj – VII Maj**

La tabla siguiente muestra la manera de crear las cuatriadas para esta escala.

**Tabla 27. Triadas de las escalas menores armónicas**

<b>Grado</b>	<b>Estructura</b>	<b>Intervalos</b>	<b>Acorde</b>
<b>I</b>	<b>I III V VII</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>II</b>	<b>II IV VI I</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Disminuida – Séptima Menor	Semidisminuido
<b>III</b>	<b>III V VII II</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Justa – Séptima Mayor	Mayor
<b>IV</b>	<b>IV VI I III</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>V</b>	<b>V VII II IV</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>VI</b>	<b>VI I III V</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa – Séptima Mayor	Mayor
<b>VII</b>	<b>VII II IV VI</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa – Séptima Menor	Séptima

De lo anterior obtenemos la progresión armónica para la escala mayor en acordes de cuatriadas:

**VI Dom – VII SemiDim – I Maj7 – II Dom – III Dom – IV Maj7 – V7**

### ***Progresión armónica de las escalas menores armónicas***

En la siguiente tabla se puede ver como se forman las triadas en esta escala.

**Tabla 28. Triadas de las escalas menores naturales**

<b>Grado</b>	<b>Estructura</b>	<b>Intervalos</b>	<b>Acorde</b>
<b>I</b>	<b>I III V</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa	Menor
<b>II</b>	<b>II IV VI</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Disminuida	Disminuida
<b>III</b>	<b>III V VII</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Aumentada	Aumentada
<b>IV</b>	<b>IV VI I</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa	Menor
<b>V</b>	<b>V VII II</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa	Mayor
<b>VI</b>	<b>VI I III</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa	Mayor
<b>VII</b>	<b>VII II IV</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Disminuida	Disminuida

Es decir, la progresión armónica para la escala mayor en acordes de triadas es:

**I min – II Dim – III Aug – IV min – V Maj – VI Maj – VII Dim**

La tabla siguiente muestra la manera de crear las cuatriadas para esta escala.

Tabla 29. Triadas de las escalas menores armónicas

Grado	Estructura	Intervalos	Acorde
<b>I</b>	<b>I III V VII</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa – Séptima Mayor	Menor
<b>II</b>	<b>II IV VI I</b>	Primera – Tercera Menor – Quinta Disminuida – Séptima Menor	Semidisminuido
<b>III</b>	<b>III V VII II</b>	Primera – Tercera Mayor – Quinta Aumentada – Séptima Mayor	Mayor Dominante
<b>IV</b>	<b>IV VI I III</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Justa – Séptima Menor	Dominante
<b>V</b>	<b>V VII II IV</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa – Séptima Menor	Séptima
<b>VI</b>	<b>VI I III V</b>	Primera - Tercera Mayor - Quinta Justa – Séptima Mayor	Mayor
<b>VII</b>	<b>VII II IV VI</b>	Primera - Tercera Menor - Quinta Disminuida – Séptima Disminuida	Disminuido

De lo anterior obtenemos la progresión armónica para la escala mayor en acordes de cuatriadas:

**I** min7 – **II** SemiDim – **III** MajDom – **IV** Dom – **V** 7 – **VI** Maj7 – **VII** Dim

### 3.2 Gramáticas

Una gramática formal es una estructura matemática con un conjunto de reglas de formación que definen las cadenas de caracteres admisibles en un determinado lenguaje formal o lengua natural. Las gramáticas formales aparecen en varios contextos diferentes: la lógica matemática, las ciencias de la computación y la lingüística teórica, frecuentemente con métodos e intereses divergentes.

En un lenguaje formal, a las cadenas formadas según las reglas de la gramática formal se las llama fórmulas bien formadas, y el conjunto de todas las fórmulas bien formadas constituye un lenguaje formal. Una gramática formal no describe el significado de las fórmulas bien formadas, sino solamente su forma. La teoría de los lenguajes formales estudia las gramáticas formales y los lenguajes formales, y es una rama de la matemática aplicada.

#### 3.2.1 Elementos constituyentes

Está compuesto por una serie de categorías sintácticas que se combinan entre sí por medio de unas reglas sintácticas que definen cómo se crea una categoría sintáctica por medio de otras o símbolos de la gramática.

Existe una única categoría superior que denota cadenas completas y válidas.

### 3.2.2 Mecanismos de especificación

Por medio de estos elementos constituyentes se define un mecanismo de especificación consistente en repetir el mecanismo de sustitución de una categoría por sus constituyentes en función de las reglas comenzando por la categoría superior y finalizando cuando la oración ya no contiene ninguna categoría.

De esta forma, la gramática puede generar o producir cada una de las cadenas del lenguaje correspondiente y sólo estas cadenas.

### 3.2.3 Definición formal

En la definición clásica que dio Noam Chomsky en la década de 1950, una gramática formal es una cuádrupla  $G = (N, T, S, P)$  donde:

- $N$  es un conjunto finito de símbolos no terminales (variables).
- $T$  es un conjunto finito de símbolos terminales (constantes), disjunto con  $N$ .
- $S$  es un símbolo distinguido de  $N$ , el símbolo inicial.
- $P$  es un conjunto finito de reglas de producción, cada una de la forma:

$$(N \cup T)^* N (N \cup T)^* \rightarrow (N \cup T)^*$$

Donde  $*$  es la clausura de Kleene.

Esto es, cada regla de producción mapea de una cadena de símbolos a otra, donde la primera cadena contiene al menos un símbolo no terminal. En el caso de que la segunda cadena sea la cadena vacía, para evitar confusión se la denota con una notación especial (usualmente  $\epsilon$ ,  $e$  o  $\lambda$ ).

El alfabeto de la gramática es entonces el conjunto  $\Sigma = N \cup T$ .

### 3.2.4 Derivaciones

Sea  $G = (N, T, S, P)$  una gramática, y sean  $\alpha, \beta, \delta, \varphi, \rho, \dots$  palabras de  $\Sigma^*$ . Entonces  $\beta$  se deriva de  $\alpha$  en un paso de derivación, y lo denotamos con  $\alpha \Rightarrow \beta$  si existen dos cadenas  $\varphi_1, \varphi_2 \in \Sigma^*$ , y una producción  $\delta \rightarrow \rho$  tales que  $\alpha = \varphi_1 \delta \varphi_2$ , y  $\beta = \varphi_1 \rho \varphi_2$ .

Notamos con  $\Rightarrow^*$  al cierre reflexivo y transitivo de  $\Rightarrow$ . Es decir  $\alpha \Rightarrow^* \beta$  denota a una secuencia de derivaciones en un número finito de pasos desde  $\alpha$  hasta  $\beta$ .

$x \in \Sigma^*$  es una forma sentencial de  $G$ , si puede obtenerse la siguiente secuencia de derivaciones  $S \Rightarrow^* x$ . En el caso particular de que  $x \in T^*$  se dice que  $x$  es una sentencia

Se denomina lenguaje formal generado por  $G$  al conjunto  $L(G) = \{X \in T^* | S \Rightarrow^* x\}$ .

## 3.3 Jerarquía de Chomsky

En lingüística la jerarquía de Chomsky es una clasificación jerárquica de distintos tipos de gramáticas formales que generan lenguajes formales.

Consta de cuatro niveles:

### 3.3.1 Gramáticas de tipo 0

No tiene restricciones. Incluye a todas las gramáticas formales. Estas gramáticas generan todos los lenguajes capaces de ser reconocidos por una máquina de Turing. Los lenguajes son conocidos como lenguajes recursivamente enumerables. Nótese que esta categoría es diferente de la de los lenguajes recursivos, cuya decisión puede ser realizada por una máquina de Turing que se detenga.

Las gramáticas que generan estos lenguajes pueden tener reglas compresoras.

Las reglas de producción son de la siguiente forma:

$$P = \{(u \rightarrow v) | u = xAy; u \in \Sigma^+; v, x, y \in \Sigma^*; A \in N\}$$

Ecuación 1. Gramática de tipo 0

### 3.3.2 Gramáticas de tipo 1

Son gramáticas sensibles al contexto. Generan los lenguajes sensibles al contexto. Estas gramáticas tienen reglas de la forma  $\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$  con  $A$  un no terminal y  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  cadenas de terminales y no terminales. Las cadenas  $\alpha$  y  $\beta$  pueden ser vacías, pero no puede serlo. La regla  $S \rightarrow \epsilon$  está permitida si  $S$  no aparece en la parte derecha de ninguna regla. Los lenguajes descritos por estas gramáticas son exactamente todos aquellos lenguajes reconocidos por una máquina de Turing determinista cuya cinta de memoria está acotada por un cierto número entero de veces sobre la longitud de entrada, también conocidas como autómatas linealmente acotados.

No existen reglas compresoras, salvo, opcionalmente, la que deriva el axioma a la palabra vacía.

Existen reglas en las que un símbolo no terminal puede derivar a formas sentenciales distintas, según los símbolos que aparezcan a su alrededor

Las reglas de producción son de la siguiente forma:

$$P = \{(S \rightarrow \lambda) \wedge (xAy \rightarrow xvy) \mid v \in \Sigma^+; x, y \in \Sigma^*; A \in N\}$$

Ecuación 2. Gramática de tipo 1

### 3.3.3 Gramáticas de tipo 2

Son gramáticas libres del contexto. Generan los lenguajes independientes del contexto. Las reglas son de la forma  $A \rightarrow \gamma$  con  $A$  un no terminal y  $\gamma$  una cadena de terminales y no terminales. Estos lenguajes son aquellos que pueden ser reconocidos por un autómata con pila.

La mayoría de los lenguajes de programación entran en ésta categoría en cuanto su forma sintáctica, aunque en realidad los lenguajes de programación son dependientes del contexto, se reconocen a través de lenguajes de tipo 2 porque su reconocimiento es de  $O(n)$  mientras que los de tipo 1 tienen un orden de reconocimiento  $O(n^3)$  en el peor

caso. Por este motivo se ejecuta un análisis semántico para reconocer si el programa es correcto.

Las reglas de producción son de la siguiente manera:

$$P = \{(S \rightarrow \lambda) \wedge (A \rightarrow v) | v \in \Sigma^+; A \in N\}$$

**Ecuación 3. Gramática de tipo 2**

### **3.3.4 Gramáticas de tipo 3**

Son gramáticas regulares. Generan los lenguajes regulares. Estas gramáticas se restringen a aquellas reglas que tienen en la parte izquierda un no terminal, y en la parte derecha un solo terminal, posiblemente seguido de un no terminal. La regla  $S \rightarrow \epsilon$  también está permitida si  $S$  no aparece en la parte derecha de ninguna regla. Estos lenguajes son aquellos que pueden ser aceptados por un autómata finito. También esta familia de lenguajes puede ser obtenida por medio de expresiones regulares.

Nótese que el conjunto de gramáticas correspondiente a los lenguajes recursivos no es un miembro de la jerarquía.

Cada lenguaje regular es a su vez libre del contexto, asimismo un lenguaje libre del contexto es también dependiente del contexto, éste es recursivo y a su vez, recursivamente enumerable. Las inclusiones son, sin embargo, propias, es decir, existen en cada nivel lenguajes que no están en niveles anteriores.

Son los lenguajes más simples dentro la Jerarquía de Chomsky. Se suelen expresar mediante expresiones regulares.

Existen 2 tipos: lineales por la derecha y lineales por la izquierda. Las reglas de producción son de la siguiente forma:

### **Lineales por la derecha:**

$$P = \{(S \rightarrow \lambda) \wedge (A \rightarrow aB) \wedge (A \rightarrow a) \mid a \in T; A, B \in N\}$$

Ecuación 4. Gramática de tipo 3 Lineal por la derecha

### **Lineales por la izquierda:**

$$P = \{(S \rightarrow \lambda) \wedge (A \rightarrow Ba) \wedge (A \rightarrow a) \mid a \in T; A, B \in N\}$$

Ecuación 5. Gramática de tipo 3 Lineal por la izquierda

## **3.4 Notación ABC**

Para representar la cadena generada por el método propuesto se decidió utilizar la notación ABC debido a que se puede interpretar de manera sencilla por un humano y procesarse computacionalmente sin mucho preprocesamiento.

La notación ABC es un lenguaje para escribir música que utiliza el conjunto de caracteres ASCII. Fue inicialmente creado por Chris Walshaw. Si bien es un lenguaje musical basado en ordenadores, uno de los principales objetivos ha sido que pueda ser leído con facilidad por los humanos. Inicialmente fue desarrollado para ser utilizado con composiciones folk y melodías tradicionales provenientes del oeste de Europa. La sintaxis también permite utilizar metadatos para cada tono.

Dado que el sistema ABC está basado en los caracteres ASCII, se puede utilizar cualquier editor de texto para editar música. Sin embargo, existen varios paquetes de software con diversas facilidades que permiten leer y procesar música escrita en sistema ABC. Otros paquetes de software han provisto salida directa (evitando la tipografía TeX), y han extendido la sintaxis para permitir la presentación de la letra de la canción alineada con las notas múltiples voces y notación con múltiples pentagramas, tablatura, y MIDI.

### 3.4.1 El formato

El formato estándar para escribir una pieza musical en notación ABC consta de dos partes: una cabecera en donde se definen los metadatos de la pista y una parte en donde se escribe la melodía en cifrado inglés. Ver Tabla 1.

```
X:<Pista>
T:<Título>
M:<Compás>
L:<Duración base>
R:<Estilo>
K:<Clave>
<Alteracion><Nota><valor> <repeticion>|<repeticion> ... <repeticion>|]
```

El siguiente ejemplo ilustra el uso de la notación musical ABC:

```
X:1
T:The Legacy Jig
M:6/8
L:1/8
R:jig
K:G
GFG BAB | gfg gab | GFG BAB | d2A AFD |
GFG BAB | gfg gab | age edB |1 dBA AFD :|2 dBA ABd |:
efe edB | dBA ABd | efe edB | gdB ABd |
efe edB | d2d def | gfe edB |1 dBA ABd :|2 dBA AFD |]
```

En este ejemplo, X: tiene el valor 1 por que solo existe una pista en el archivo, T: tiene la cadena “The Legacy Jig” como título, M: define el compás a 6/8, L: define el valor de 1/8 como referencia, R: tiene la cadena “jig” para especificar el estilo y en K: usa el cifrado de SOL para la armadura.

Este ejemplo puede ser traducido a notación musical tradicional utilizando una de las herramientas de conversión ABC existentes. Por ejemplo, el software abc2score produce una salida que es similar a la que se muestra en la Ilustración 14.

### The Legacy Jig



Ilustración 14. Partitura del ejemplo usando ABC

### 3.5 Formulación del problema

Desarrollar una herramienta informática que genere un archivo en notación ABC que represente música tonal occidental a partir de gramáticas libres de contexto jerarquizadas para cada uno de los niveles de producción para la cadencia, la melodía, la armonía, el bajo, una sección final y la construcción de la progresión total de la obra en base al estilo musical definido por el usuario.

## METODOLOGÍA

El objetivo general de esta tesis (Sección 1.3.1) es generar composiciones musicales completas. En este capítulo se explica detalladamente la metodología utilizada para conseguir ese objetivo y los algoritmos usados en cada uno de los módulos que componen el procedimiento.

### 4.1 Algoritmo general

Para obtener una composición musical completa, se utilizó el algoritmo general mostrado en el diagrama de flujo de la Ilustración 16.

#### 4.1.1 Estructura de una obra musical

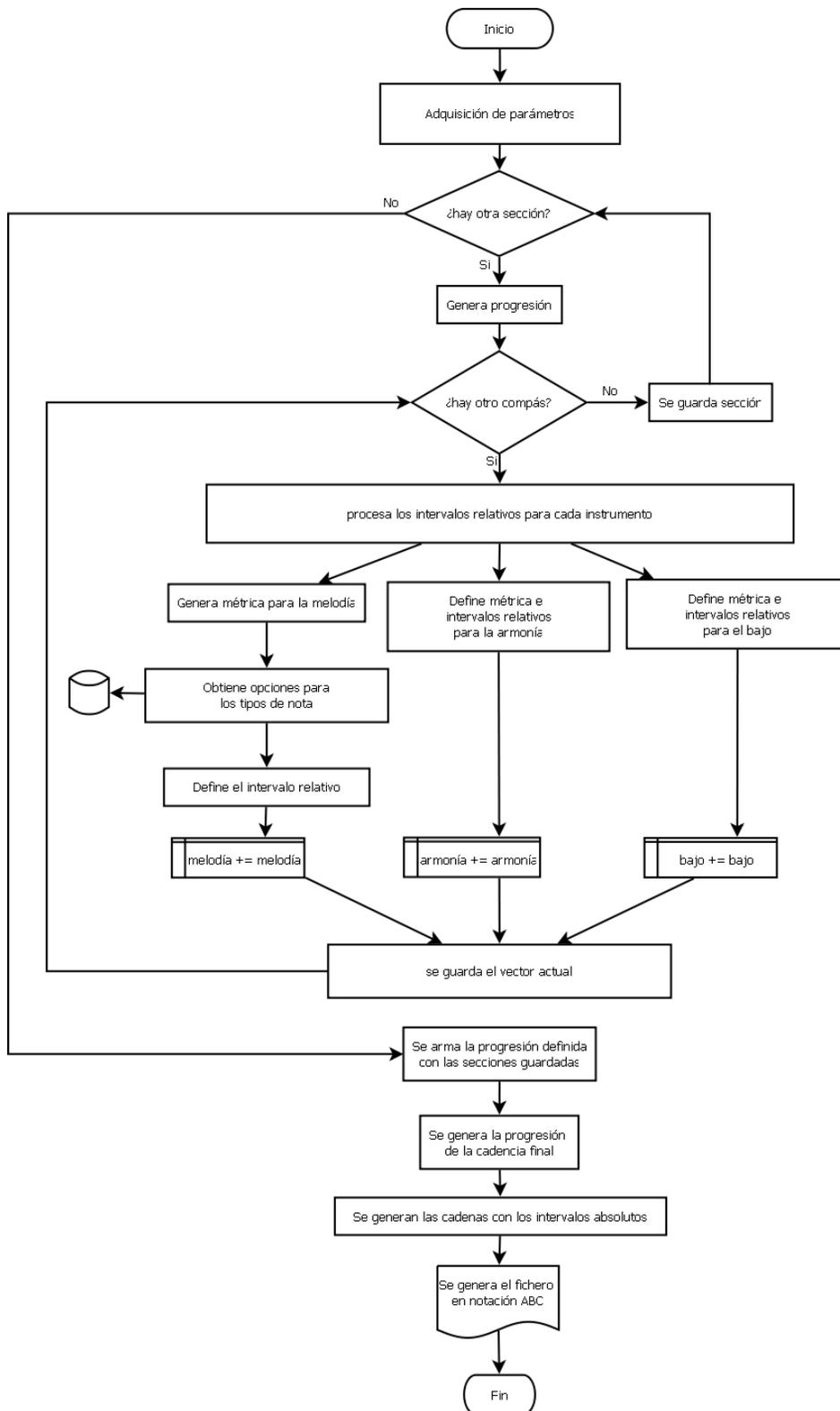
A partir de los componentes de la obra musical, se propuso la estructura de una obra musical que se muestra en la Ilustración 15.



**Ilustración 15. Estructura de una obra musical**

En donde el número de secciones y la posición de las mismas es definido por el usuario. En el ejemplo anterior, la sección B es la misma en las dos posiciones.

Además, las secciones están estructuradas a partir de la definición de la progresión para cada uno de los compases que la componen, esto se ilustra en la Ilustración 17. En este mismo ejemplo, la cadena generada en el grado II es diferente para cada compás.



**Ilustración 16. Diagrama de flujo del algoritmo general**

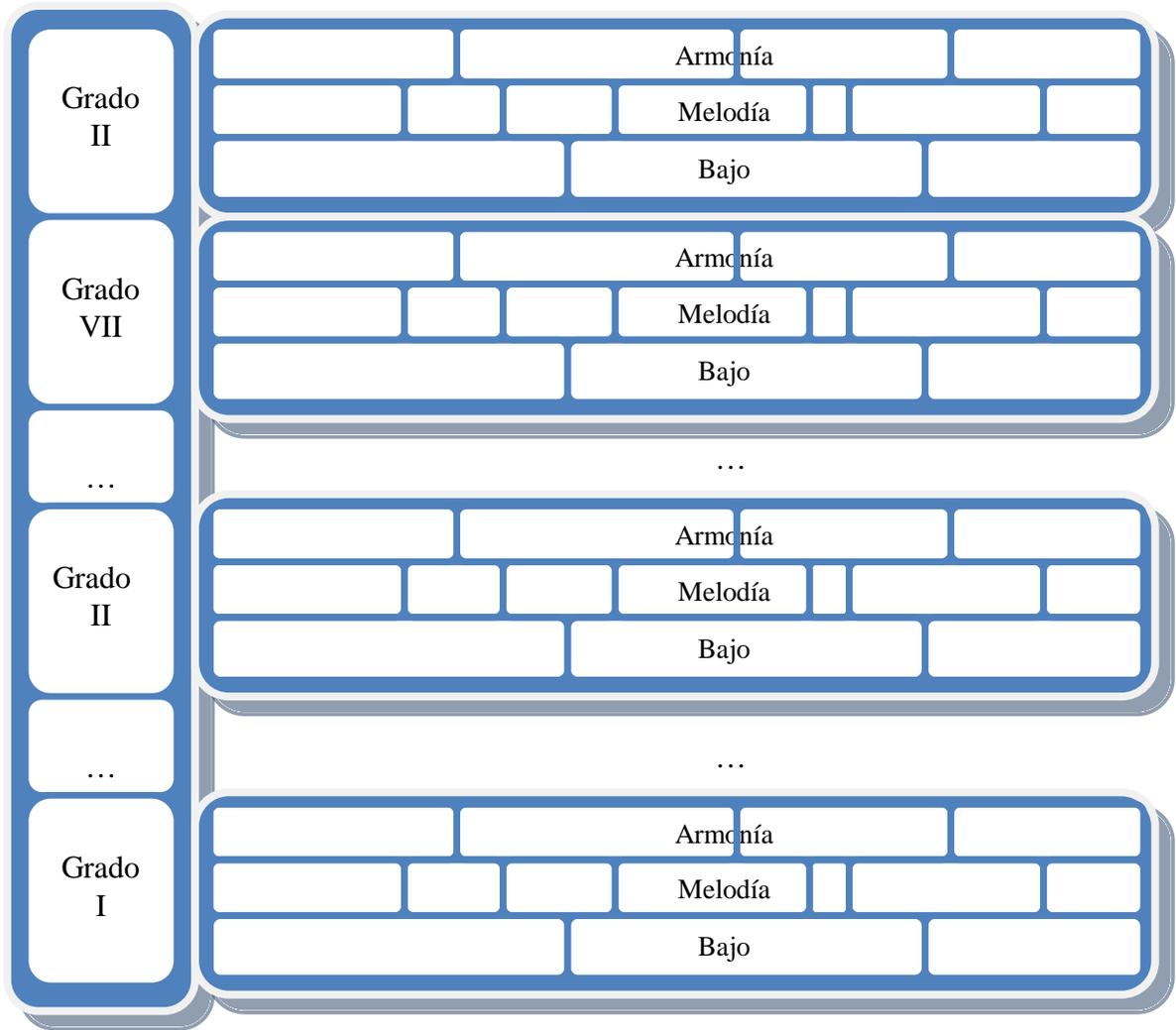


Ilustración 17. Diagrama de bloques para cada sección

## 4.2 La base de datos

Para almacenar las reglas de producción, se utiliza una base de datos sencilla, consta de una sola tabla definida como *gramatica(id, nombre, izquierda, palabra, estilo)*. En donde *id* es el identificador de la regla, *nombre* almacena el tipo de la regla, *izquierda* contiene el símbolo no terminal, *palabra* contiene el símbolo terminal, *estilo* almacena el estilo definido.

### 4.3 Los módulos

Para la creación de los módulos, se crearon los siguientes algoritmos.

#### 4.3.1 El proceso de generación de la progresión por compás

Para cada sección, el usuario define la cantidad de compases que tendrá la progresión. Esta progresión es formada por las reglas básicas del discurso musical (reposo – tensión – reposo). El algoritmo utilizado es el siguiente:

---

```
Entrada: n_compases = Número de compases
generaProgresión(n_compases)
abrir la DB
cadencia ← DB (seleccionar "palabra" en "progresión" donde "izquierda"
= "w")
iterar: desde i = 1 hasta n_compases
    auxiliar ← ""
    palabra ← progresión.palabra(1)
    opciones ← DB(buscar cantidad de opciones para "palabra" en
"progresión")
    progresión.palabra(1) ← DB (seleccionar "palabra" en "progresión"
donde "id" = opciones.(aleatorio))
termina iteración de i
cerrar la DB
regresa progresión
Salida: Regresa la cadena de la progresión para la sección.
```

---

##### 4.3.1.1 Las reglas de producción de la progresión por compás

*w* → *reposo*

*reposo* → *reposo tension*

*tension* → *paso tension*

*paso* → *tension paso | paso paso | paso reposo | reposo paso*

#### 4.3.2 El proceso de generación de los grados

Los grados son la base de nuestra obra, ya que a partir de estos se crean los intervalos y de ahí los demás componentes.

---

**Entrada:** progresión = La cadena de la progresión.

```
generar grados(progresión)
abrir la DB
iterar: desde i = 1 hasta progresión.numeroDePalabras
    palabra ← progresión.palabra(i)
    opciones ← DB(buscar cantidad de opciones para "palabra" en
"grados")
    progresión.palabra(i) ← DB (seleccionar "palabra" en "grados"
donde "id" = opciones.(aleatorio));
termina iteración de i
cerrar la DB
regresa grados
Salida: regresa la cadena de los grados
```

---

#### 4.3.2.1 *Las reglas de producción de los grados*

A partir de las escalas y modos definidos se construyen las notas de los grados que usará la composición.

*reposo* → *I*  
*reposo* → *VI*  
*paso* → *IV*  
*paso* → *II*  
*tension* → *V*  
*tension* → *III*

<i>I</i> <sub>1</sub> → <i>fundamental</i>	<i>II</i> <sub>1</sub> → <i>segunda</i>	<i>III</i> <sub>1</sub> → <i>tercera</i>	<i>IV</i> <sub>1</sub> → <i>cuarta</i>
<i>I</i> <sub>2</sub> → <i>tercera</i>	<i>II</i> <sub>2</sub> → <i>cuarta</i>	<i>III</i> <sub>2</sub> → <i>quinta</i>	<i>IV</i> <sub>2</sub> → <i>sexta</i>
<i>I</i> <sub>3</sub> → <i>quinta</i>	<i>II</i> <sub>3</sub> → <i>sexta</i>	<i>III</i> <sub>3</sub> → <i>septima</i>	<i>IV</i> <sub>3</sub> → <i>octava</i>
<i>I</i> <sub>4</sub> → <i>septima</i>	<i>II</i> <sub>4</sub> → <i>octava</i>	<i>III</i> <sub>4</sub> → <i>novena</i>	<i>IV</i> <sub>4</sub> → <i>decima</i>
<i>V</i> <sub>1</sub> → <i>quinta</i>	<i>VI</i> <sub>1</sub> → <i>sexta</i>	<i>VII</i> <sub>1</sub> → <i>septima</i>	
<i>V</i> <sub>2</sub> → <i>septima</i>	<i>VI</i> <sub>2</sub> → <i>octava</i>	<i>VII</i> <sub>2</sub> → <i>novena</i>	
<i>V</i> <sub>3</sub> → <i>novena</i>	<i>VI</i> <sub>3</sub> → <i>decima</i>	<i>VII</i> <sub>3</sub> → <i>onceava</i>	
<i>V</i> <sub>4</sub> → <i>onceava</i>	<i>VI</i> <sub>4</sub> → <i>doceava</i>	<i>VII</i> <sub>4</sub> → <i>treceava</i>	

### 4.3.3 El proceso de generación de la melodía

La melodía depende de la progresión porque es la que va a dar el color a las frases generadas. Para generar estas frases, primero se necesita dar la estructura básica con los grados.

El modelo que se propuso para este trabajo, se basa en tomar la nota fundamental como base para el desarrollo conjunto de armonía y melodía, pero combinando ambos con un enfoque basado en el análisis del discurso musical, es decir, en los contrastes armónicos y en la métrica rítmica para la acentuación y el valor que tiene en la generación de la melodía.

Para este trabajo, definimos dos acentos en la música, el *Arsis* que en la acción de dirigir, significa el movimiento hacia arriba del ritmo, corresponde con los tiempos débiles y la *Tesis* que en la acción de dirigir, significa el movimiento hacia abajo del ritmo, corresponde con los tiempos fuertes del ritmo.

Para un compás de 4/4, iniciando en el valor mayor que corresponde al compás se dividieron los tiempos y los acentos de la manera mostrada en la Tabla 30.

Cada acento representado va ligado a un tipo de nota que corresponde a las escalas y grado de la tonalidad definida por el usuario. Los acentos son:

**Tabla 30. División de los compases y asignación de fuerza y tipo de nota**

Tiempo	Figuras resultantes	Acentos
1	Redonda	Fuerte
2	Blanca   Blanca	Semifuerte   Débil
4	Negra   Negra	Semifuerte   Débil
8	Corchea   Corchea   Corchea   Corchea	Semifuerte   muy débil   Débil   muy débil
16	Semicorchea   Semicorchea Semicorchea   Semicorchea	Débil   muy débil muy débil   muy débil
32	Fusa   Fusa   Fusa   Fusa Fusa   Fusa   Fusa   Fusa	Débil   muy débil   muy débil   muy débil muy débil   muy débil   muy débil   muy débil

— *Fuerte*: Corresponde a la nota fundamental relativa, es decir, la correspondiente al grado.

- *Semi-fuerte*: Son las notas relativas al acorde del grado, estas notas generan la estructura de la idea.
- *Débil*: Son las notas correspondientes al modo o a la escala usada, estas notas dan la forma, se usan como notas de paso.
- *Muy débil*: Estas son notas de adorno, pertenecen a la escala cromática.

Dada la intensidad del acento, una nota no puede tener una duración mayor de la jerarquía a la que pertenece, esto es, una nota débil no puede tener una duración mayor a la de una nota semi-fuerte.

Cuando se tiene una estructura de la frase generada, se selecciona una de las notas del acorde para cada una de las notas en la cadena señalada como semi-fuerte.

Posteriormente, para cada nota marcada como débil se utiliza una nota de la escala para dar la forma a la estructura métrica.

Al final, se selecciona una nota cromática para las notas de adorno. Para el alcance de este trabajo se utiliza una nota aleatoria, pero se tiene en cuenta que se necesita refinar esta selección en trabajo futuro.

La melodía es la sucesión coherente de las notas según su acentuación. Para generar la melodía implementamos el siguiente algoritmo:

---

**Entrada:** profundidad = La cantidad de veces que se va a iterar para los tiempos.

```

melodia(profundidad)
cadena ← DB (seleccionar "palabra" en "metrica" donde "izquierda" =
"w")
abrir la DB
  iterar: desde i = 1 hasta profundidad
    iterar: desde j = 1 hasta cadena.numeroDePalabras
      palabra ← cadena.palabra(j)
      opciones ← DB(buscar cantidad de opciones para "palabra" en
"metrica")

```

```

    valores ← DB (seleccionar "palabra" en "metrica" donde "id" =
opciones.(aleatorio));
    melodia.tipo ← valores(1)
    melodia.tiempo ← valores(2)
    cadena.palabra(j) ← valores
    termina iteración de j
    termina iteración de i
    cerrar la DB
    regresa melodía
Salida: la cadena de la melodía

```

---

```

Entrada: grado = El grado; tonalidad = la tonalidad; escala = la
escala; melodía = la cadena de la melodía.
generaIntervalosMelodia(grado, tonalidad, escala, melodia)
abrir la DB
    iterar: desde i = 1 hasta melodia.numeroDePalabras
        si melodia.(i).tipo es n_acorde
            opciones ← DB(buscar cantidad de opciones para "palabra" en
"n_acorde" donde "grado" = grado)
            melodia(i).tipo ← DB (seleccionar "palabra" en "n_acorde"
donde "grado" = grado y "id" = opciones.(aleatorio));
            si melodia.(i).tipo es n_escala
                opciones ← DB(buscar cantidad de opciones para "palabra" en
"n_escala" donde "escala" = escala)
                melodia(i).tipo ← DB (seleccionar "palabra" en "n_escala"
donde "escala" = escala y "id" = opciones.(aleatorio));
            si melodia.(i).tipo es n_adorno
                melodia(i).tipo ← DB (seleccionar "palabra" en "n_adorno"
donde "id" = aleatorio()%12);
            termina iteración de i
    cerrar la DB
    regresa melodía
Salida: la cadena de la melodía con los intervalos

```

---

#### **4.3.3.1 Las reglas de producción de la melodía**

Las reglas de producción utilizadas en este módulo para la generación de la melodía son las siguientes.

<i>F4</i> → <i>z4</i>	<i>d1</i> → <i>d1</i>	<i>D//</i> → <i>D//</i>
<i>F4</i> → <i>F4</i>	<i>d1</i> → <i>d/ d/</i>	<i>D//</i> → <i>D/// d///</i>
<i>F4</i> → <i>f2 D2</i>	<i>d1</i> → <i>d/ z/</i>	<i>D//</i> → <i>D/// z///</i>
<i>F4</i> → <i>f2 z2</i>	<i>d1</i> → <i>z/ d/</i>	<i>D//</i> → <i>z/// d///</i>
<i>F4</i> → <i>z2 D2</i>		
<i>f2</i> → <i>f2</i>	<i>f/</i> → <i>f/</i>	<i>d//</i> → <i>d//</i>
<i>f2</i> → <i>1 d1</i>	<i>f/</i> → <i>f// d//</i>	<i>d//</i> → <i>d/// d///</i>
<i>f2</i> → <i>f1 z1</i>	<i>f/</i> → <i>f// z//</i>	<i>d//</i> → <i>d/// z///</i>
<i>f2</i> → <i>z1 d1</i>	<i>f/</i> → <i>z// d//</i>	<i>d//</i> → <i>z/// d///</i>
		<i>f///</i> → <i>f///</i>
<i>D2</i> → <i>D2</i>	<i>D/</i> → <i>D/</i>	<i>f///</i> → <i>f//// d////</i>
<i>D2</i> → <i>D1 d1</i>	<i>D/</i> → <i>D// d//</i>	<i>f///</i> → <i>f//// z////</i>
<i>D2</i> → <i>D1 z1</i>	<i>D/</i> → <i>D// z//</i>	<i>f///</i> → <i>z//// d////</i>
<i>D2</i> → <i>z1 d1</i>	<i>D/</i> → <i>z// d//</i>	
		<i>D///</i> → <i>D///</i>
<i>f1</i> → <i>f1</i>	<i>d/</i> → <i>d/</i>	<i>D///</i> → <i>D//// d////</i>
<i>f1</i> → <i>f/ d/</i>	<i>d/</i> → <i>d// d//</i>	<i>D///</i> → <i>D//// z////</i>
<i>f1</i> → <i>f/ z/</i>	<i>d/</i> → <i>d// z//</i>	<i>D///</i> → <i>z//// d////</i>
<i>f1</i> → <i>z/ d/</i>	<i>d/</i> → <i>z// d//</i>	
		<i>d///</i> → <i>d///</i>
<i>D1</i> → <i>D1</i>	<i>f//</i> → <i>f//</i>	<i>d///</i> → <i>d//// d////</i>
<i>D1</i> → <i>D/ d/</i>	<i>f//</i> → <i>f/// d///</i>	<i>d///</i> → <i>d//// z////</i>
<i>D1</i> → <i>D/ z/</i>	<i>f//</i> → <i>f/// z///</i>	<i>d///</i> → <i>z//// d////</i>
<i>D1</i> → <i>z/ d/</i>	<i>f//</i> → <i>z/// d///</i>	

#### 4.3.4 El proceso de generación de la armonía

La armonía también depende directamente de la progresión definida para la sección, ya que es la estructura que va a seguir. Sin la progresión, la armonía es únicamente una definición de tiempos de acorde que no tienen sentido.

Posteriormente se definen las notas de acorde usando la primera, la tercera y la quinta nota del grado. Estos acordes forman la parte alta de la armonía.

Ya que se tienen los acordes, se usa la métrica definida para acomodar esos elementos en la obra musical, dando así forma a la parte armónica del estilo.

Se especifica qué modo de escala se va a utilizar para generar los grados y qué tipo de acordes se van a generar, ya sean triadas o cuatriadas según la tonalidad definida.

Teniendo la definición de los intervalos relativos de todo lo anterior, queda como una plantilla a utilizar.

La armonía está compuesta por el componente armónico superior (alto) y el bajo y el algoritmo de generación utilizado es el que se presenta a continuación.

---

**Entrada:** estilo = El estilo.

```
Armonia(estilo)
  abrir la DB
  opciones ← DB(buscar cantidad de opciones para "palabra" en
"armonia" donde "dependencia" = "estilo")
  armonia ← DB (seleccionar "palabra" en "armonia" donde "id" =
opciones.(aleatorio));
  cerrar la DB
regresa armonía
```

**Salida:** regresa la cadena de la armonía

---

**Entrada:** grado = el grado; tonalidad = la tonalidad; escala = la escala; armonía = la cadena de la armonía.

```
intervalosArmonia(grado, tonalidad, escala, armonia)
abrir la DB
  iterar: desde i = 1 hasta armonía.numeroDePalabras
    armonia.(i) ← DB (seleccionar "palabra" en "acorde" donde
"grado" = grado);
  termina iteración de i
cerrar la DB
```

**Salida:** Regresa la cadena de la armonía

---

La generación de la gramática de los acordes para la música tonal, se definió por las escalas a utilizar.

#### **4.3.4.1 Las reglas de producción de la armonía**

La métrica de los acordes en intervalos relativos está dada por las siguientes reglas de producción.

**De tiempo completo:** Es un acorde que suena durante todo el compás, es para matizar la melodía únicamente, muy usado en la música clásica.

*largo | alto → acordes 8/*

**A tiempo par:** Es un tipo de acorde que suena en cada tiempo par durante un tiempo y tiene silencios en los tiempos impares con duración de un tiempo.

*contraAlto | alto → z2/ acordes 2/ z2/ acordes 2/*

Para la representación de las gramáticas de los acordes se ocupan corchetes cuadrados y una matriz de tres o cuatro elementos en forma vertical, esto significa que las notas deben sonar al mismo tiempo.

Los intervalos de los acordes de triadas fueron construidos a partir de las notas de los grados y son utilizados como la parte alta de la armonía.

#### **4.3.4.2 Triadas**

Para las triadas solamente se ocuparon las primeras tres notas del grado. Son utilizadas para las cadencias estables y sobre escalas mayores o menores.

$$acordes \rightarrow \begin{bmatrix} acorde_1 \\ acorde_2 \\ acorde_3 \end{bmatrix}$$

#### **4.3.4.3 Cuatriadas**

Para las cuatriadas de séptima, que son las definidas en este trabajo, se ocuparon las primeras cuatro notas del grado. Se utilizan en cadencias con más tensión sobre escalas mayores, menores y algunas escalas exóticas y algunos modos.

$$acordes \rightarrow \begin{bmatrix} acorde_1 \\ acorde_2 \\ acorde_3 \\ acorde_4 \end{bmatrix}$$

#### **4.3.5 El proceso de generación de un instrumento rítmico-melódico**

El proceso de generación de la parte del instrumento rítmico-melódico está basado, igual que los otros instrumentos, en la progresión generada para cada compás. Esta progresión definida en grados es la que dará la instancia al bajo definido.

Este instrumento se genera a partir de la definición de la métrica y los intervalos relativos para el estilo. El algoritmo es el siguiente.

---

**Entrada:** estilo = El estilo.

```
Bajo(estilo)
  abrir la DB
  opciones ← DB(buscar cantidad de opciones para "palabra" en
"bajo" donde "dependencia" = "estilo")
  bajo ← DB (seleccionar "palabra" en "bajo" donde "id" =
opciones.(aleatorio));
  cerrar la DB
regresa armonía
```

**Salida:** regresa la cadena del bajo

---

**Entrada:** grado = el grado; tonalidad = la tonalidad; escala = la  
escala; bajo = la cadena del bajo.

```
intervalosBajo(grado, tonalidad, escala, bajo)
abrir la DB
  iterar: desde i = 1 hasta bajo.numeroDePalabras
    si bajo.(i) tipo es n_bajol
      bajo.(i) ← DB (seleccionar "palabra" en "n_bajol" donde
"grado" = grado);
    si bajo.(i) es n_acorde2
      bajo.(i) ← DB (seleccionar "palabra" en "n_bajo2" donde
"grado" = grado);
    si bajo.(i) es n_acorde3
      bajo.(i) ← DB (seleccionar "palabra" en "n_bajo3" donde
"grado" = grado);
  termina iteración de i
  cerrar la DB
```

**Salida:** Regresa la cadena del bajo

---

#### **4.3.5.1 Las reglas de producción del bajo**

Se definen bajos clásicos para la posible utilización según el estilo definió por el usuario.

$w \rightarrow \text{bajo}$

Los bajos implementados para esta herramienta son:

**Ostinato:** Un bajo sobre la nota tónica que va a cada tiempo base de la melodía, muy usado en metal y rock.

*ostinato | bajo → acorde1 – 12 2/ acorde1 – 12 2/ acorde1 – 12 2/ acorde1 – 12 2/*

**Tiempo impar:** Es un tipo de bajo que depende de la nota tónica y la quinta en cada tiempo impar, es muy usado en música ranchera.

*bajoTiempo | bajo → acorde1 – 12 2/ z2/ acorde3 – 12 2/ z2/*

**Tiempo doble impar:** Es un tipo de bajo que depende de la nota tónica y la quinta en cada tiempo impar con una duración de dos tiempos.

*bajoTiempo2 | bajo → acorde1 – 12 4/ acorde3 – 12 4/*

**Tiempo largo:** Es un tipo de bajo que depende de la nota tónica con una duración de cuatro tiempos.

*largo | bajo → acorde1 – 12 8/*

**Tiempo tropical:** Es un tipo de bajo que depende de la nota tónica, la tercera y la quinta con una duración de dos tiempos para la tónica y un tiempo para las demás.

*cumbia | bajo → acorde1 – 12 4/ acorde2 – 12 2/ acorde3 – 12 2/*

#### 4.3.6 Los valores de los intervalos

Cuando ya se tienen los intervalos con la estructura y la definición de cada una de las partes, se asignó un valor absoluto a cada una de ellas, se utilizó el siguiente algoritmo:

---

**Entrada:** La cadena de armonía.

```
valoresArmonia(armonia)
```

```
abrir la DB
```

```
iterar: desde i = 1 hasta armonia.alto.numeroDePalabras
```

```
    armonia.palabra(i).alto ← DB (seleccionar "palabra" en  
"intervalos" donde "intervalos" = armonia.palabra(i).alto)
```

```
termina iteración de i
```

```
iterar: desde i = 1 hasta armonia.bajo.numeroDePalabras
```

```
    armonia.palabra(i).bajo ← DB (seleccionar "palabra" en
```

```
"intervalos" donde "intervalos" = armonia.palabra(i).bajo);
termina iteración de i
cerrar la DB
regresa armonía
```

**Salida:** Los cadena con los valores absolutos de la armonía en sus componentes alto y bajo.

---

**Entrada:** La cadena de la melodía.

```
genera valoresMelodia(melodía)
abrir la DB
iterar: desde i = 1 hasta melodia.numeroDePalabras
    melodia.palabra(i).tipo ← DB (seleccionar "palabra" en
    "intervalos" donde "intervalos" = melodia.palabra(i).tipo);
termina iteración de i
cerrar la DB
regresa melodía
```

**Salida:** la cadena con la melodía con sus intervalos absolutos

---

#### 4.3.6.1 Las reglas de producción de los intervalos

El movimiento en la altura de las notas será de manera relativa con respecto a la nota fundamental. Para el intervalo de estas alturas se suma este valor con los siguientes intervalos:

<i>primera</i> → 0	<i>quintaDim</i> → 6
<i>primeraMaj</i> → 0	<i>quintaJst</i> → 7
<i>primeraAug</i> → 1	<i>quintaAug</i> → 8
<i>segundaDim</i> → 0	<i>sextaDim</i> → 7
<i>segundaMin</i> → 1	<i>sextaMin</i> → 8
<i>segundaMaj</i> → 2	<i>sextaMaj</i> → 9
<i>segundaAug</i> → 3	<i>septimaDim</i> → 9
<i>terceraDim</i> → 2	<i>sextaAug</i> → 10
<i>terceraMin</i> → 3	<i>septimaMin</i> → 10
<i>terceraMaj</i> → 4	<i>septimaMaj</i> → 11
<i>terceraAug</i> → 5	<i>septimaAug</i> → 12
<i>cuartaDim</i> → 4	<i>octavaDim</i> → 12
<i>cuartaJst</i> → 5	<i>octavaMaj</i> → <i>primera</i> + 13
<i>cuartaAug</i> → 6	<i>octavaAug</i> → <i>primeraAug</i> + 13

*novenaDim* → *segundaDim* + 13  
*novenaMin* → *segundaMin* + 13  
*novenaMaj* → *segundaMaj* + 13  
*novenaAug* → *segundaAug* + 13  
*onceavaDim* → *cuartaDim* + 13  
*onceavaJst* → *cuartaJst* + 13  
*onceavaAug* → *cuartaAug* + 13  
*treceavaDim* → *sextaDim* + 13  
*treceavaMin* → *sextaMin* + 13

*treceavaMaj* → *sextaMaj* + 13  
*treceavaAug* → *sextaAug* + 13  
*octava* → *primera*  
*novena* → *segunda*  
*decima* → *tercera*  
*onceava* → *cuarta*  
*doceava* → *quinta*  
*treceava* → *sexta*

#### **4.3.7 La cadencia final**

La cadencia final es una sección generada igual que las anteriores pero con datos de entrada muy específicos.

Se ocupa la cadencia perfecta, es decir, la progresión es definida por el grado V seguido del grado I, con un estilo armónico largo y el bajo largo. Con una profundidad de métrica melódica de 5 para el grado V y de 1 para el grado I.

Además, se puede seleccionar que la cadencia sea dada seguidamente de una de las secciones dando el reposo en un último compás con estilo largo de bajo y armonía y una profundidad de 1 para la melodía sobre el grado I.

#### **4.3.8 El proceso de armado de la progresión**

La progresión final es formada por la concatenación de todas las secciones guardadas. Estas secciones se pueden repetir cualquier número finito de veces y el orden es dado por el usuario en el formulario de entrada de los parámetros.

Esta progresión es completamente a gusto del usuario y cada una de las secciones puede usarse indistintamente como una sección en particular, es decir, las reglas de generación son las mismas.

Posteriormente de esa concatenación, se agrega a la cadena la cadencia final definida, dando así la resolución de la obra.

#### 4.3.8.1 Las reglas de producción para el formato de salida.

Para generar una cadena que se pueda reproducir, es necesario definir la nota fundamental definida que va a dar un valor numérico a la sustitución, este valor numérico está definido de la siguiente manera:

0 → C,,	24 → C	48 → c'
1 → ^C,,	25 → ^C	49 → ^c'
2 → D,,	26 → D	50 → d'
3 → ^D,,	27 → ^D	51 → ^d'
4 → E,,	28 → E	52 → e'
5 → F,,	29 → F	53 → f'
6 → ^F,,	30 → ^F	54 → ^f'
7 → G,,	31 → G	55 → g'
8 → ^G,,	32 → ^G	56 → ^g'
9 → A,,	33 → A	57 → a'
10 → ^A,,	34 → ^A	58 → ^a'
11 → B,,	35 → B	59 → b'
12 → C,	36 → c	60 → c''
13 → ^C,	37 → ^c	61 → ^c''
14 → D,	38 → d	62 → d''
15 → ^D,	39 → ^d	63 → ^d''
16 → E,	40 → e	64 → e''
17 → F,	41 → f	65 → f''
18 → ^F,	42 → ^f	66 → ^f''
19 → G,	43 → g	67 → g''
20 → ^G,	44 → ^g	68 → ^g''
21 → A,	45 → a	69 → a''
22 → ^A,	46 → ^a	70 → ^a''
23 → B,	47 → b	71 → b''

#### 4.3.9 Las reglas de producción de las escalas

Se definió que las escalas deben de ser completas, es decir, deben de especificar los siete intervalos de estas debido a que los grados dependen de la especificación de las escalas y la generación de los acordes vienen dados por las mismas notas de las escalas.

#### 4.3.9.1 Escala mayor

La escala mayor está formada por la sucesión de intervalos de la siguiente manera

Tabla 31. Intervalo de la escala mayor para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Mayor

Por lo que, cuando queremos generar una melodía con una nota fundamental mayor, usamos esta escala para generar la idea.

*fundamental* → *primera*

*segunda* → *segundaMaj*

*tercera* → *terceraMaj*

*cuarta* → *cuartaJst*

*quinta* → *quintaJst*

*sexta* → *sextaMaj*

*septima* → *septimaMaj*

#### 4.3.9.2 Escala menor

La gramática para la escala menor natural es la misma que el modo eólico, pero por desambiguar y hacer más intuitiva la herramienta para el usuario, también es definida.

Tabla 32. Intervalo de la escala menor para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Mayor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Menor	Séptima Menor

*fundamental* → *primera*  
*segunda* → *segundaMaj*  
*tercera* → *terceraMin*  
*cuarta* → *cuartaJst*  
*quinta* → *quintaJst*  
*sexta* → *sextaMin*  
*septima* → *septimaMin*

#### 4.3.9.3 Escala pentatónica mayor

Para la escala pentatónica mayor, se definieron los grados cuarto y séptimo como vacíos para tener la escala completa.

Tabla 33. Intervalo de la escala pentatónica mayor para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	--	Quinta Justa	Sexta Mayor	--

*fundamental* → *primera*  
*segunda* → *segundaMaj*  
*tercera* → *terceraMaj*  
*cuarta* →  $\varepsilon$   
*quinta* → *quintaJst*  
*sexta* → *sextaMaj*  
*septima* →  $\varepsilon$

#### 4.3.9.4 Escala pentatónica menor

Igual que la escala anterior, para la escala pentatónica menor, se definieron los grados segundo y sexto como vacíos para tener la escala completa.

Tabla 34. Intervalo de la escala pentatónica menor para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	--	Tercera Mayor	Cuarta Justa	Quinta Justa	--	Séptima Mayor

*fundamental* → *primera*  
*segunda* →  $\varepsilon$   
*tercera* → *terceraMin*

*cuarta* → *cuartaJst*  
*quinta* → *quintaJst*  
*sexta* →  $\varepsilon$   
*septima* → *septimaMin*

#### 4.3.9.5 Los modos griegos

Los modos griegos son usados en diferentes estilos musicales como el jazz, el flamenco o la música andaluz, además de contener entre ellos a las escalas mayor y menor natural.

Igual que las escalas, cada modo está definido por los intervalos determinados para cada uno.

#### 4.3.9.6 Jónico

Este modo es el correspondiente a la escala mayor natural usado en el sistema occidental moderno.

Para la construcción de la gramática se usó el intervalo siguiente:

Tabla 35. Intervalo del modo jónico para la construcción de la gramática

Fundamental	Segunda	Tercera	Cuarta	Quinta	Sexta	Séptima
Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Mayor

*fundamental* → *primera*  
*segunda* → *segundaMaj*  
*tercera* → *terceraMaj*  
*cuarta* → *cuartaJst*  
*quinta* → *quintaJst*  
*sexta* → *sextaMaj*  
*septima* → *septimaMaj*

#### 4.3.9.7 Dórico

Para la construcción de la gramática se usó el intervalo siguiente:

Tabla 36. Intervalo del modo dórico para la construcción de la gramática

Fundamental	Segunda	Tercera	Cuarta	Quinta	Sexta	Séptima
-------------	---------	---------	--------	--------	-------	---------

Primera	Segunda Mayor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Menor
---------	------------------	------------------	-----------------	-----------------	----------------	------------------

*fundamental* → primera

*segunda* → segundaMaj

*tercera* → terceraMin

*cuarta* → cuartaJst

*quinta* → quintaJst

*sexta* → sextaMaj

*septima* → septimaMin

#### 4.3.9.8 Frigio

Es muy usado en la guitarra flamenca. Su parte importante es la relación con la tónica.

Para la construcción de la gramática se usó el intervalo siguiente:

Tabla 37. Intervalo del modo frigio para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Menor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Menor	Séptima Menor

*fundamental* → primera

*segunda* → segundaMin

*tercera* → terceraMin

*cuarta* → cuartaJst

*quinta* → quintaJst

*sexta* → sextaMin

*septima* → septimaMin

#### 4.3.9.9 Lidio

Para la construcción de la gramática se usó el intervalo siguiente:

Tabla 38. Intervalo del modo lidio para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Aumentada	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Mayor

*fundamental* → *primera*

*segunda* → *segundaMaj*

*tercera* → *terceraMaj*

*cuarta* → *cuartaAug*

*quinta* → *quintaJst*

*sexta* → *sextaMaj*

*septima* → *septimaMaj*

#### 4.3.9.10 Mixolidio

Para la construcción de la gramática se usó el intervalo siguiente:

Tabla 39. Intervalo del modo mixolidio para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Mayor	Tercera Mayor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Mayor	Séptima Menor

*fundamental* → *primera*

*segunda* → *segundaMaj*

*tercera* → *terceraMaj*

*cuarta* → *cuartaJst*

*quinta* → *quintaJst*

*sexta* → *sextaMaj*

*septima* → *septimaMin*

#### 4.3.9.11 Eólico

El modo eólico concuerda con la escala menor natural. Ideal para acordes menores y sus extensiones.

Para la construcción de la gramática se usó el intervalo siguiente:

Tabla 40. Intervalo del modo eólico para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Mayor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Justa	Sexta Menor	Séptima Menor

*fundamental* → *primera*

*segunda* → *segundaMaj*

*tercera* → *terceraMin*  
*cuarta* → *cuartaJst*  
*quinta* → *quintaJst*  
*sexta* → *sextaMin*  
*septima* → *septimaMin*

#### 4.3.9.12 Locrio

Tabla 41. Intervalo del modo locrio para la construcción de la gramática

<b>Fundamental</b>	<b>Segunda</b>	<b>Tercera</b>	<b>Cuarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Séptima</b>
Primera	Segunda Menor	Tercera Menor	Cuarta Justa	Quinta Disminuida	Sexta Menor	Séptima Menor

*fundamental* → *primera*  
*segunda* → *segundaMin*  
*tercera* → *terceraMin*  
*cuarta* → *cuartaJst*  
*quinta* → *quintaDim*  
*sexta* → *sextaMin*  
*septima* → *septimaMin*

#### 4.3.9.13 Jerarquía de una composición musical

Dadas las dependencias anteriores, para la composición de una obra musical, dependiendo de cada una de las partes, hemos generado el árbol de que se muestra en la Ilustración 18.

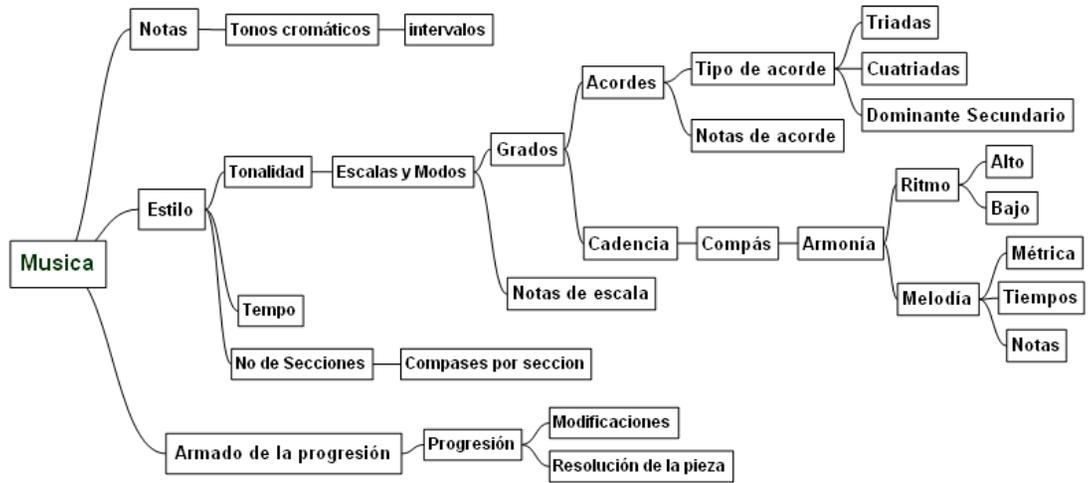


Ilustración 18. Árbol de tareas

## EVALUACIÓN

En el siguiente capítulo se describe la metodología utilizada para evaluar la generación de música, así como cada uno de los módulos que compone la herramienta y los datos generados por esta. También se define la razón por la que se utilizan estos criterios.

### 5.1 Obtención de los criterios de evaluación

Para la obtención de criterios de evaluación y llevar un orden en la construcción de los ítems y preguntas de los instrumentos utilizados para el método propuesto en base a su funcionalidad y a los archivos generados, se ha utilizado el siguiente formato:

**Tabla 42. Formato de definición de criterios de evaluación**

Variable	Dimensión	Criterios	Ítems	Nivel
Objetivo a evaluar	La parte del objetivo que se puede evaluar	Cómo se evalúa esta parte	La forma en la que se puede obtener esa evaluación	Quién puede evaluar este objetivo

### 5.2 Los aspectos de evaluación

Estos son los aspectos de evaluación utilizados debido a que aportan información acerca de la eficiencia del método para generar una obra musical y del uso de la herramienta en diferentes niveles de conocimiento.

#### 5.2.1 La melodía

Los aspectos que se van a evaluar según los criterios son los siguientes:

**Tabla 43. Criterios de evaluación para la melodía**

Variable	Dimensión	Criterios o Indicadores	Nivel
Melodía	Composición	El sonido es agradable	Básico
		Expresa una idea musical	Avanzado
	Notas de acorde	Suenan bien en esa posición	Básico
		Se ocupan las notas que lleva el acorde	Avanzado

	Solo se usan esas notas	Básico
	Las notas de acorde forman una buena estructura	Avanzado
Las notas de escala	Suenan bien en esa posición	Básico
	Se ocupan las notas que compone esa escala	Avanzado
	Solo se usan esas notas	Básico
	Las notas de escala dan una buena forma	Avanzado
Notas de adorno	Suenan bien en esa posición	Básico
	Solo se usan esas notas	Básico
	Las notas de adorno afectan la tonalidad, rompen el discurso o se abusa de ellas	Avanzado
Escalas y Modos	Las escalas utilizadas se escuchan bien	Avanzado
	Las escalas dan creatividad a la melodía	Avanzado
Métrica	Los valores de tiempo crean una frase bien formada	Avanzado
	Los silencios tienen sentido	Básico
Tonalidad	Respetar la tonalidad	Avanzado
La herramienta	Se pueden definir nuevas escalas	N/A
	Las escalas existentes se pueden usar sobre cualquier tonalidad que defina el usuario	
	Se pueden usar diferentes escalas durante la misma obra	

### 5.2.2 La armonía

Los aspectos que se van a evaluar según los criterios son los siguientes:

**Tabla 44. Criterios de evaluación para la armonía**

Variable	Dimensión	Criterios o Indicadores	Ítems	Nivel
Armonía	Composición	El sonido es agradable		Básico
		La armonía suena bien con el resto de la obra		Básico
		La armonía pertenece al estilo		Avanzado
	Acordes	Los acordes están bien formados		Avanzado
		Los acordes pertenecen a los grados		Avanzado
	Componentes alto y bajo	El ritmo es coherente en sus componentes alto y bajo		Avanzado
	Tonalidad	Los acordes pertenecen a la tonalidad		Avanzado
		Se usan los acordes según la tonalidad de la obra		Avanzado

Herramienta	Se pueden definir nuevos acordes Se pueden crear arpeggios	N/A
-------------	---	-----

### 5.2.3 El estilo

Los aspectos que se van a evaluar según los criterios son los siguientes:

**Tabla 45. Criterios de evaluación para el estilo**

Variable	Dimensión	Criterios o Indicadores	Ítems	Nivel
El estilo	La composición	La obra corresponde al estilo definido		Avanzado
	Ritmo	El ritmo corresponde con el estilo		Avanzado
	El compás	El compás es coherente con el ritmo		Avanzado
	La herramienta	Puede definirse a gusto del usuario Se pueden crear nuevas reglas para nuevos ritmos Se generan automáticamente		N/A

### 5.2.4 Las secciones

Los aspectos que se van a evaluar según los criterios son los siguientes:

**Tabla 46. Criterios de evaluación para las secciones**

Variable	Dimensión	Criterios o Indicadores	Ítems	Nivel
Las secciones	La composición	Suena bien cada una de las secciones		Básico
		Suena bien el cambio de una sección a otra		Básico
	Los grados	Cada grado corresponde a un compás		Avanzado
	La cadencia	La cadencia es dinámica		Avanzado
	La resolución de la pieza	El final de la obra suena bien		Básico
		La resolución de la obra respeta las cadencias clásicas		Avanzado
La herramienta	Se puede generar otro tipo de grado Se puede generar otro tipo de cadencia Se puede generar otro tipo de resolución de la pieza		N/A	

### 5.2.5 La herramienta

Los aspectos que se van a evaluar según los criterios son los siguientes:

**Tabla 47. Criterios de evaluación para la herramienta**

Variable	Dimensión	Criterios o Indicadores	Ítems	Nivel
----------	-----------	-------------------------	-------	-------

---

La herramienta	Personalización	Permite agregar nuevas gramáticas
		Permite modificar las gramáticas existentes
	Flexibilidad	Se puede definir completamente un nuevo sistema de composición basado en reglas propias del usuario
	Inteligente	Aprende las reglas de estilo de manera automática

---

### 5.3 La forma de evaluación

A partir de los criterios de evaluación ya definidos, se pueden conseguir los datos a partir de diferentes enfoques.

#### 5.3.1 Método comparativo

La evaluación se lleva a cabo en base a los parámetros de algo existente.

Consiste en comparar cada uno de los criterios señalados entre el uso del método de la herramienta desarrollada y otras herramientas existentes.

#### 5.3.2 Cuestionarios

En esta forma de evaluación, los datos se obtienen del conocimiento y punto de vista de las personas que utilicen la herramienta.

La calidad de la obra se puede evaluar por expertos en música.

La funcionalidad de la herramienta se puede evaluar por usuarios:

- Músicos con conocimiento básico en computación.
- Expertos en computación que no tienen nociones musicales.
- Público general (con conocimientos básicos o sin conocimiento en música y con conocimientos básicos en el uso de la computadora).

En ambos casos se mide calidad y funcionalidad, la diferencia está en el nivel. Habrá usuarios que solo puedan medir la calidad en un nivel básico y la funcionalidad en un nivel básico o avanzado. Habrá otros que puedan evaluar la calidad y la funcionalidad en un nivel superior y la funcionalidad en un nivel variable.

## 5.4 Obtención de los datos

Los datos de evaluación para hacer el análisis son obtenidos por cuestionarios y se hace uso de los siguientes tipos de preguntas:

### 5.4.1 Preguntas cerradas dicotómicas.

Preguntas que tienen sólo dos opciones de respuesta:

*Después de escuchar la obra musical anterior, ¿considera usted que el sonido es agradable?*

Si  No

### 5.4.2 Preguntas cerradas con varias opciones de respuesta.

Preguntas que tienen más de dos opciones de respuesta.

*Después de escuchar la obra musical anterior, ¿cómo considera usted la calidad de la composición?*

Buena  Regular  Mala

### 5.4.3 Preguntas de respuestas múltiples.

El participante puede elegir más de una opción o categoría de respuesta:

*Marque con una cruz todas las opciones que considere necesarias.*

*De las siguientes características, cuáles considera usted describen la obra musical recién escuchada:*

- Sonido agradable
- Expresa una idea
- Las notas de acorde forman una buena estructura
- Las notas de escala dan una buena forma
- Las notas de adorno afectan la tonalidad, rompen el discurso o se abusa de ellas

- ( ) El acento musical corresponde al compás.
- ( ) Respeta la tonalidad.
- ( ) Los valores de tiempo crean una frase bien formada.
- ( ) Los silencios tienen sentido.

**5.4.4 Preguntas de jerarquización**

Hay otras preguntas en las que se jerarquizan opciones:

*Ordene las partes de la obra musical que le gustaron más.*

- ( 4 ) La melodía
- ( 1 ) La armonía
- ( 5 ) La sucesión de acordes
- ( 3 ) El cambio entre secciones
- ( 2 ) La resolución de la obra

**5.4.5 Preguntas de evaluación numérica**

Después de escuchar la obra musical anterior, en una escala de 0 a 10, en donde cero es pésimo y 10 es perfecto:

Pregunta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
¿Cómo calificaría su calidad?											

**5.4.6 Preguntas abiertas.**

¿Cuál es su opinión de la obra musical que acaba de escuchar?

---



---



---

## 5.5 Formatos de evaluación usados (cuestionarios)

**Instituto Politécnico Nacional**  
Centro de Investigación en Computación  
Laboratorio de Lenguaje Natural y Procesamiento de Texto

**Cuestionario para la evaluación de una obra musical generada por gramáticas dinámicas**

Formato para usuarios

El siguiente cuestionario tiene la finalidad de evaluar la calidad de una obra musical generada por una herramienta de composición automática, así como la funcionalidad de la herramienta propuesta. Esto a partir de la percepción de los usuarios.

**Después de escuchar la obra musical, responda:**

¿Cuál es su opinión de la obra musical que acaba de escuchar?

---

---

**Melodía**

¿Considera usted que se ha generado una melodía agradable?  Si  No

¿Considera usted que se ha generado una secuencia agradable?  Si  No

¿Suenan bien en esa posición?  Si  No

¿Los silencios tienen sentido?  Si  No

Al emplear las notas de acorde (las que suenan igual a la parte del ritmo) ¿cómo considera su uso?  
 Bueno  Regular  Malo

**Armonía**

¿Considera usted que esta tiene un acompañamiento agradable.  Si  No

¿La armonía suena bien con el resto de la obra?  Si  No

**Las secciones**

¿Suena bien cada una de las secciones?  Si  No

¿Suena bien el cambio de una sección a otra?  Si  No

¿El final de la obra suena bien?  Si  No

**Instituto Politécnico Nacional**  
**Centro de Investigación en Computación**  
**Laboratorio de Lenguaje Natural y Procesamiento de Texto**

**Cuestionario para la evaluación de una obra musical generada por gramáticas dinámicas**

Formato para usuarios

**Herramienta**

Según la funcionalidad de la herramienta empleada para generar la melodía de la pieza musical, marque con una cruz las opciones que sean ciertas:

- La herramienta permite que las escalas existentes se puedan usar sobre cualquier tonalidad que defina el usuario.
- La utilización de la herramienta facilita el uso de diferentes escalas durante la misma obra.
- La herramienta permite definir nuevos acordes
- Al usar la herramienta se pueden crear arpeggios
- La herramienta facilita que el estilo pueda definirse a gusto del usuario
- Al emplear la herramienta se pueden crear nuevas reglas para nuevos ritmos.
- La herramienta genera estilos automáticamente cuando el usuario no los establezca.
- Al determinar las secciones, la herramienta facilita que se pueda generar otro tipo de grado
- Al determinar las secciones, la herramienta facilita que se pueda generar otro tipo de cadencia
- Al determinar las secciones, la herramienta facilita que se pueda generar otro tipo de resolución de la pieza

A continuación se presenta una serie de afirmaciones respecto a la funcionalidad de la herramienta propuesta para la generación de música, señale una de las cinco opciones presentadas para cada una de ellas.

1.- La herramienta permite definir nuevas escalas de manera:

- Muy sencilla       Sencilla       Ni sencilla ni difícil       Difícil       Muy difícil

4.- La herramienta permite definir nuevos acordes de manera:

- Muy sencilla       Sencilla       Ni sencilla ni difícil       Difícil       Muy difícil

6.- La herramienta permite que el estilo pueda definirse a gusto del usuario de manera:

- Muy sencilla       Sencilla       Ni sencilla ni difícil       Difícil       Muy difícil

7.- Al emplear la herramienta se pueden crear nuevas reglas para nuevos ritmos de manera:

- Muy sencilla       Sencilla       Ni sencilla ni difícil       Difícil       Muy difícil

9.- La herramienta facilita que se pueda generar otro tipo de grado de manera:

- Muy sencilla       Sencilla       Ni sencilla ni difícil       Difícil       Muy difícil

10.- La herramienta facilita que se pueda generar otro tipo de cadencia de manera:

- Muy sencilla       Sencilla       Ni sencilla ni difícil       Difícil       Muy difícil

11.- La herramienta facilita que se pueda generar otro tipo de resolución de la pieza de manera:

- Muy sencilla       Sencilla       Ni sencilla ni difícil       Difícil       Muy difícil

**Instituto Politécnico Nacional**  
Centro de Investigación en Computación  
Laboratorio de Lenguaje Natural y Procesamiento de Texto

**Cuestionario para la evaluación de una obra musical generada por gramáticas dinámicas**

Formato para expertos

El siguiente cuestionario tiene la finalidad de evaluar la calidad de una obra musical generada por una herramienta de composición automática a partir de los criterios propios de la teoría musical, así como determinar la funcionalidad de la herramienta propuesta.

La melodía de la obra musical recién escuchada, ¿expresa una idea musical?

Si  No

¿Considera que las notas de acorde utilizadas en la melodía forman una buena estructura?

Si  No

En la pieza musical, ¿se utilizan todas las notas necesarias para formar el acorde?

Si  No

En la pieza musical generada por la herramienta, ¿se utilizan todas las notas que deben conformar la escala?

Si  No

¿Cómo evalúa la forma creada por las notas de escala?

Bueno

Regular

Malo

¿Cómo evalúa la utilización de las notas de adorno?

Bueno

Regular

Malo

¿Considera usted que las notas de adorno generadas para la melodía afectan la tonalidad?

Si  No

¿Considera usted que las notas de adorno generadas para la melodía rompen el discurso?

Si  No

¿Considera usted que se abusa de las notas de adorno?

Si  No

Después de escuchar la pieza generada por la herramienta, ¿Cómo evalúa la calidad del uso producido por las escalas utilizadas?

Bueno

Regular

Malo

Según su opinión, ¿las escalas utilizadas dan creatividad a la melodía?

Si  No

Los valores de tiempo generados para la melodía de la pieza musical, ¿crean una frase bien formada?

Se puede considerar que la obra musical recién escuchada, ¿respeto la tonalidad?

Si  No

Después de escuchar la melodía de la obra musical anterior, en una escala de 0 a 10, en donde cero es deficiente y 10 es óptima:

<b>Pregunta</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Cómo calificaría su calidad											
La armonía pertenece al estilo											
Los acordes están bien formados											
Los acordes pertenecen a los grados											
El ritmo es coherente en sus componentes alto y bajo											
Los acordes pertenecen a la tonalidad											
La obra corresponde al estilo definido											
El ritmo corresponde con el estilo											
El compás es coherente con el ritmo											
Cada grado corresponde a un compás											
La cadencia es dinámica											
La resolución de la obra respeta las cadencias clásicas											

¿Cuál es su opinión de la obra musical que acaba de escuchar?

---



---



---



---

### 5.5.1 Representación de la evaluación.

- Tablas comparativas con otras herramientas de composición asistida por computadora.
- Tablas estadísticas con los resultados de los cuestionarios.

## 5.6 Resultados obtenidos

Después de aplicar los cuestionarios de evaluación a diferentes sectores, se han obtenido los datos que se muestran y analizan en esta sección.

### 5.6.1 Aspectos básicos

En este apartado se muestra el análisis de los datos obtenidos al aplicar el cuestionario para la evaluación de los aspectos básicos de una obra musical generada por el método propuesto a personas de entre 25 y 80 años con un nivel variado de conocimiento musical.

#### Análisis de la melodía

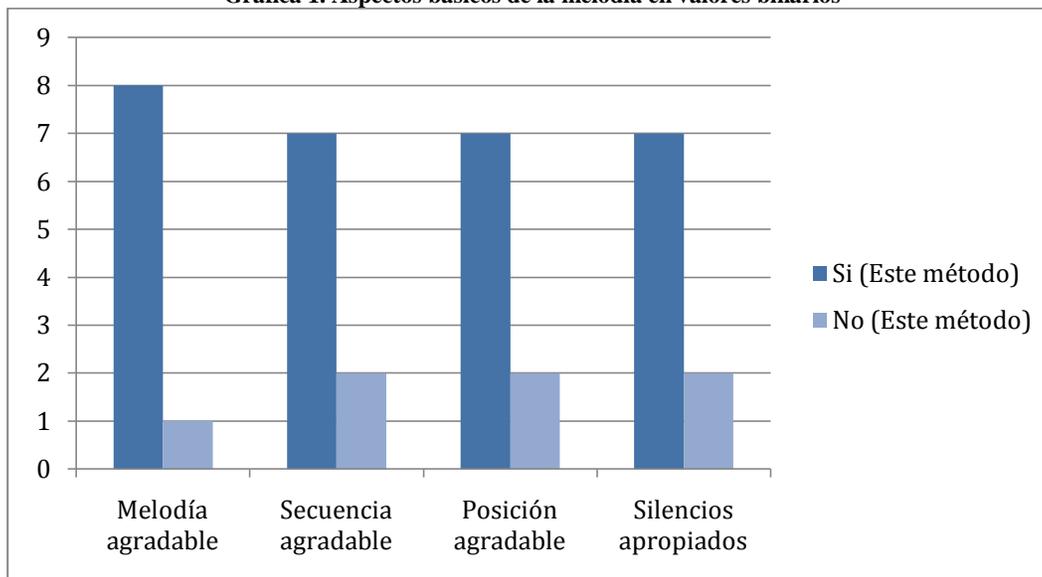
Las siguientes tablas muestran la comparación de los aspectos básicos a evaluar de la melodía generada. Los datos obtenidos son resultados binarios (si/no) y se muestran en la Tabla 48.

**Tabla 48. Aspectos básicos de la melodía en valores binarios**

Criterio	Este método	
	Si	No
Melodía agradable	8	1
Secuencia agradable	7	2
Posición agradable	7	2
Silencios apropiados	7	2

Los datos obtenidos a partir de esta tabla se representan gráficamente en seguida.

**Gráfica 1. Aspectos básicos de la melodía en valores binarios**



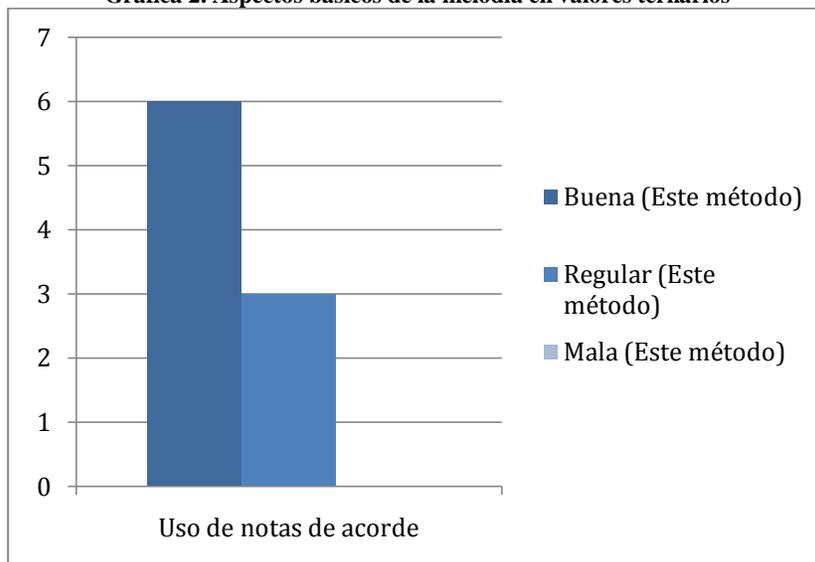
De lo anterior, se concluye que la melodía generada es agradable.

Los siguientes datos obtenidos son resultados ternarios (Buena/Regular/Mala) y se muestran en la Tabla 49.

**Tabla 49. Aspectos básicos de la melodía en valores ternarios**

Criterio	Este método		
	Buena	Regular	Mala
Uso de notas de acorde	6	3	0

**Gráfica 2. Aspectos básicos de la melodía en valores ternarios**



De lo que se puede decir que la melodía, para esta muestra poblacional, es mejor que regular.

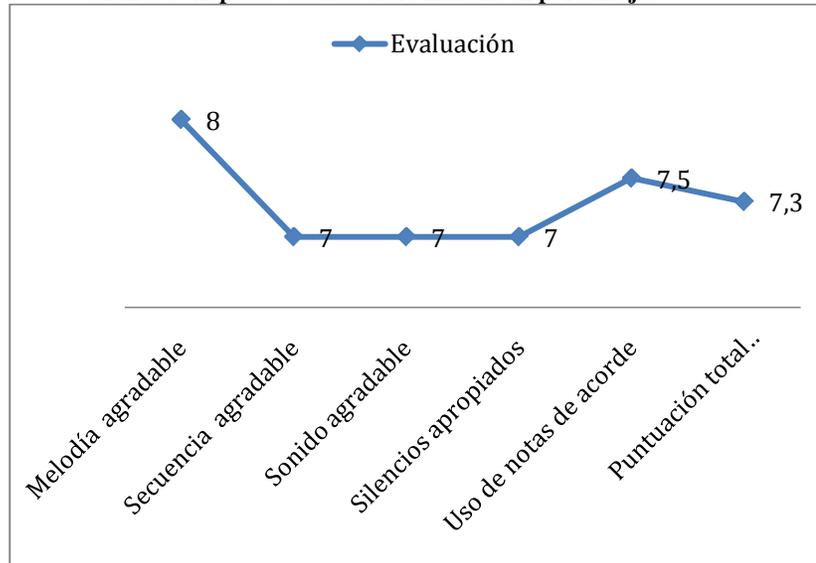
Los datos obtenidos son resultados comparativos en porcentaje y se muestran en la Tabla 50.

**Tabla 50. Aspectos básicos de la melodía en porcentajes**

<b>Criterio</b>	<b>Este método</b>
Melodía agradable	8
Secuencia agradable	7
Sonido agradable	7
Silencios apropiados	7
Uso de notas de acorde	4.5
<b>Promedio</b>	<b>7</b>

Los datos son graficados a continuación.

**Gráfica 3. Aspectos básicos de la melodía en porcentajes**



De esta gráfica se obtiene una calificación regular de la generación de la melodía.

### **Análisis de la armonía**

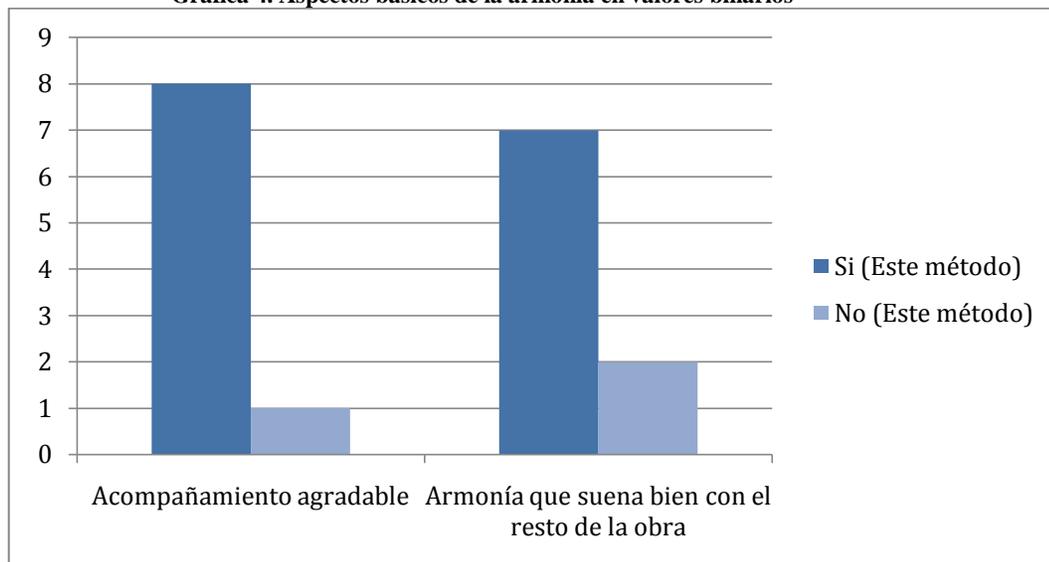
Las siguientes tablas muestran la comparación de los aspectos básicos a evaluar de la armonía generada. Los datos obtenidos son resultados binarios (si/no) y se muestran en la Tabla 51.

**Tabla 51. Aspectos básicos de la armonía en valores binarios**

Criterio	Este método	
	Si	No
Acompañamiento agradable	8	1
Armonía que suena bien con el resto de la obra	7	2

Los datos de la tabla anterior se muestran en una gráfica de barras a continuación.

**Gráfica 4. Aspectos básicos de la armonía en valores binarios**



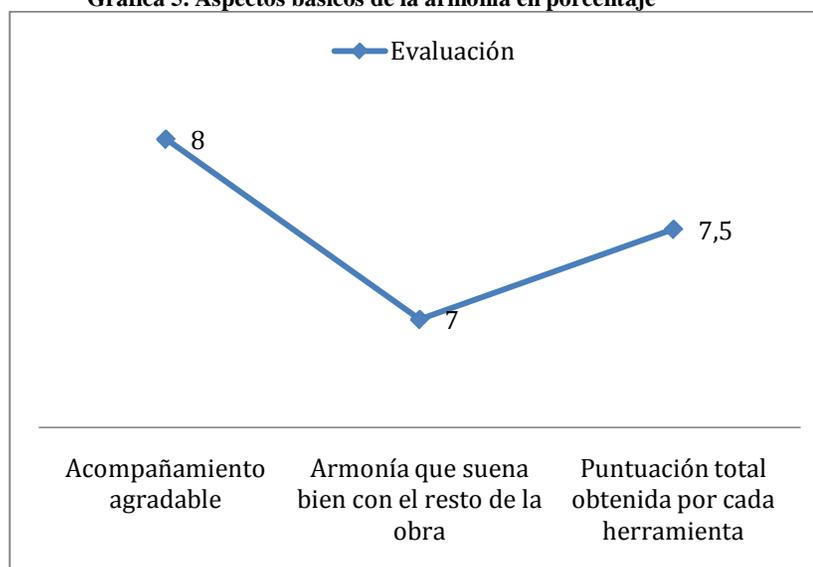
Se puede observar que el acompañamiento le parece agradable a más personas.

Los datos obtenidos son resultados comparativos y se muestran el promedio en la Tabla 52.

**Tabla 52. Aspectos básicos de la armonía en porcentaje**

Criterio	Este método
Acompañamiento agradable	8
Armonía que suena bien con el resto de la obra	7
Puntuación total obtenida por cada herramienta	7,5

**Gráfica 5. Aspectos básicos de la armonía en porcentaje**



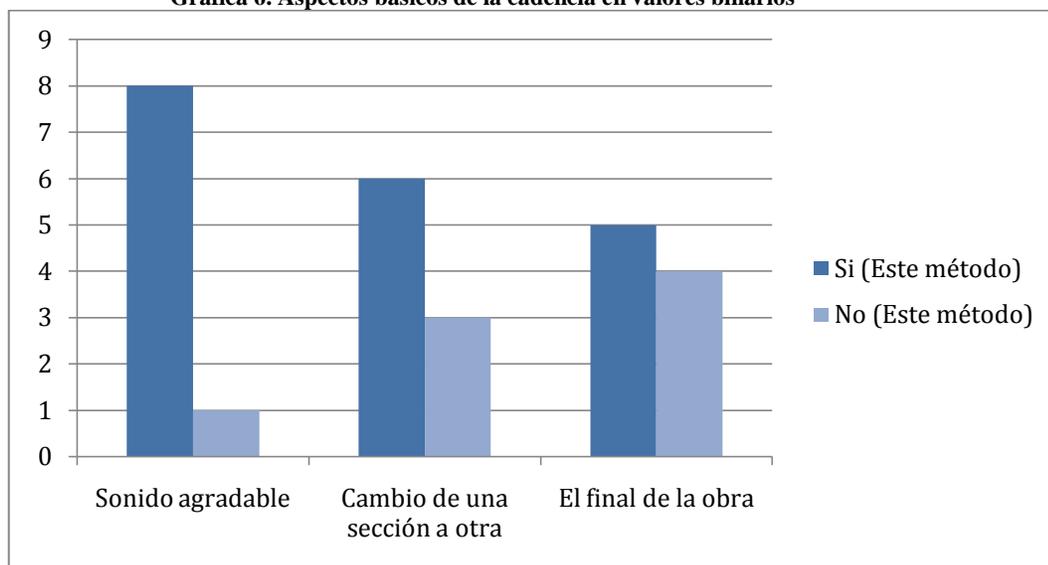
## Análisis de la cadencia

Las siguientes tablas muestran la comparación de los aspectos básicos a evaluar de la cadencia generada. Los datos obtenidos son resultados binarios (si/no) y se muestran en la Tabla 53.

**Tabla 53. Aspectos básicos de la cadencia en valores binarios**

Criterio	Este método	
	Si	No
Sonido agradable	8	1
Cambio de una sección a otra	6	3
El final de la obra	5	4

**Gráfica 6. Aspectos básicos de la cadencia en valores binarios**

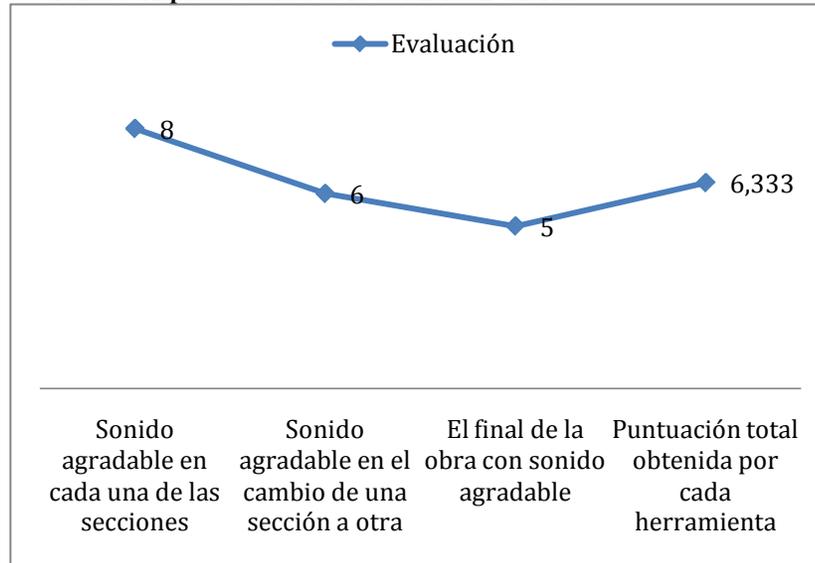


Los datos obtenidos son resultados comparativos y se muestran los porcentajes en la Tabla 54.

**Tabla 54. Aspectos básicos de la cadencia en valores**

Criterio	Este método
Sonido agradable en cada una de las secciones	8
Sonido agradable en el cambio de una sección a otra	6
El final de la obra con sonido agradable	5
Puntuación total obtenida por cada herramienta	6.333

Gráfica 7. Aspectos básicos de la cadencia en valores



### 5.6.2 Aspectos avanzados

En este apartado se muestra el análisis de los datos obtenidos al aplicar el cuestionario para la evaluación de los aspectos avanzados de una obra musical generada aleatoriamente y otra generada por el método propuesto a personas de entre 28 y 80 años con un nivel avanzado de conocimiento musical.

#### Análisis de la melodía

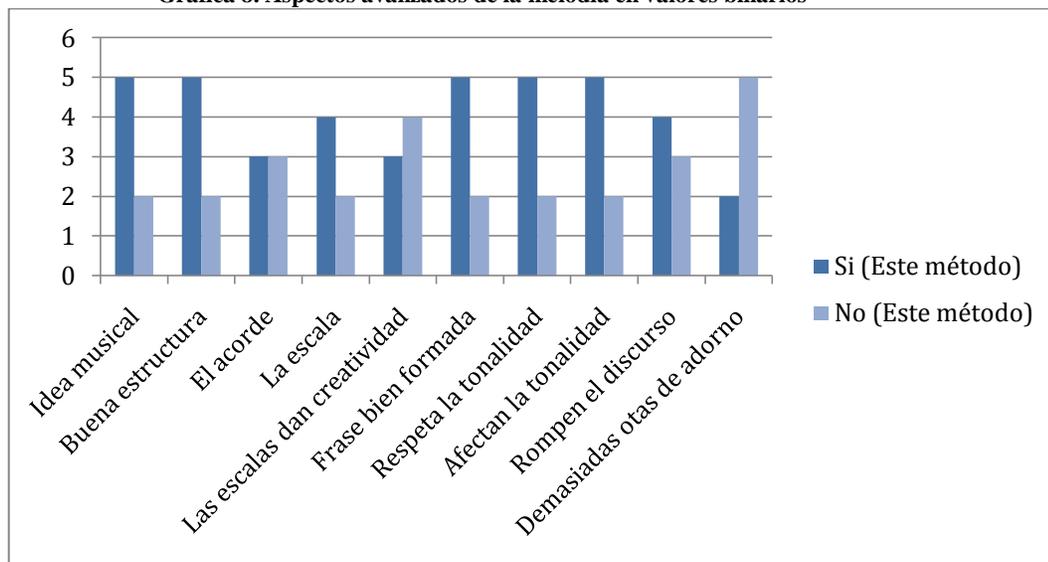
Las siguientes tablas muestran la comparación de los aspectos avanzados a evaluar de la melodía generada. Los datos obtenidos son resultados binarios (si/no) y se muestran en la Tabla 55.

Tabla 55. Aspectos avanzados de la melodía en valores binarios

Criterio	Este método	
	Si	No
Idea musical	5	2
Buena estructura	5	2
Utilización de todas las notas necesarias para formar el acorde	4	2
Utilización de todas las notas que deben formar la escala	4	2
Las escalas utilizadas dan creatividad a la melodía	3	4

<b>Los valores de tiempo generados, crean una frase bien formada</b>	5	2
<b>La obra generada respeta la tonalidad</b>	5	2
<b>Las notas de adorno generadas afectan la tonalidad</b>	5	2
<b>Las notas de adorno generadas rompen el discurso</b>	4	3
<b>Se abusa de las notas de adorno</b>	2	5

**Gráfica 8. Aspectos avanzados de la melodía en valores binarios**

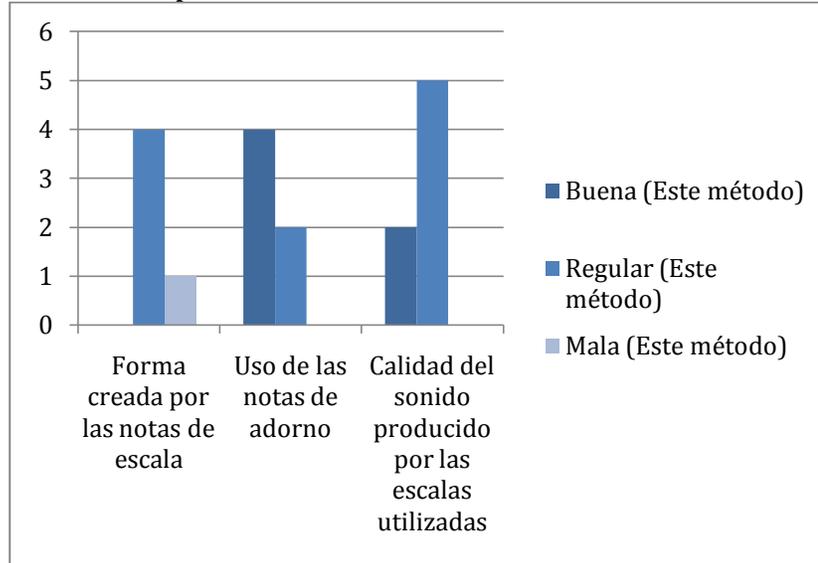


Los datos obtenidos son resultados ternarios (Regular/Buena/Mala) y se muestran en la Tabla 56.

**Tabla 56. Aspectos avanzados de la melodía en valores ternarios**

Criterio	Este método		
	Buena	Regular	Mala
<b>Forma creada por las notas de escala</b>	0	4	1
<b>Uso de las notas de adorno</b>	4	2	0
<b>Calidad del sonido producido por las escalas utilizadas</b>	2	5	0

**Gráfica 9. Aspectos avanzados de la melodía en valores ternarios**

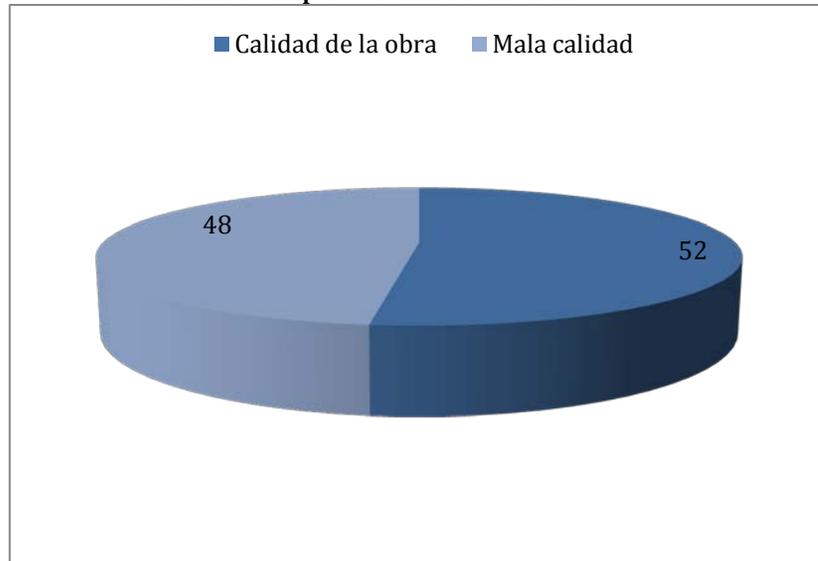


Los datos obtenidos son resultados comparativos y se muestran los promedios en la Tabla 57.

**Tabla 57. Aspectos avanzados de la melodía en valores**

Criterio	Este método
Calidad de la obra	52

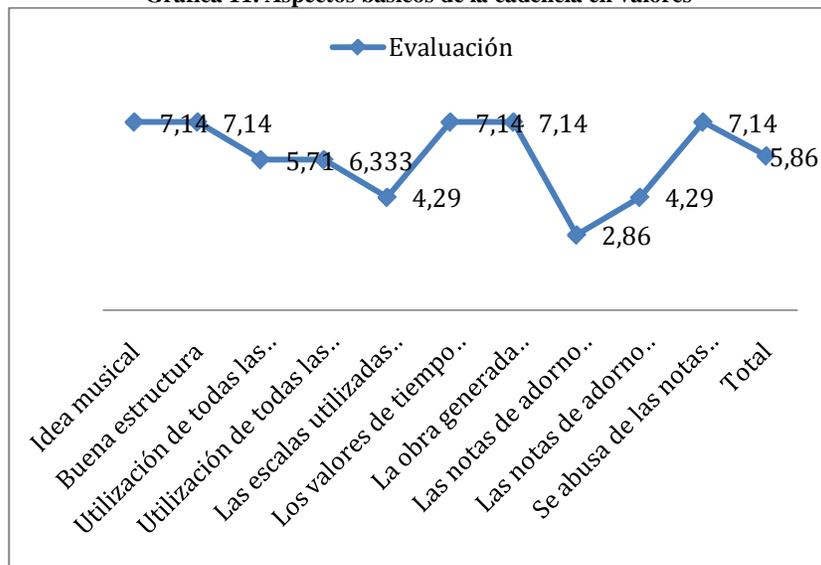
**Gráfica 10. Aspectos avanzados en valores**



**Tabla 58. Aspectos avanzados de melodía en valores porcentuales**

<b>Criterio</b>	<b>Este método</b>
<b>Idea musical</b>	7.14
<b>Buena estructura</b>	7.14
<b>Utilización de todas las notas necesarias para formar el acorde</b>	5.71
<b>Utilización de todas las notas que deben formar la escala</b>	5.71
<b>Las escalas utilizadas dan creatividad a la melodía</b>	4.29
<b>Los valores de tiempo generados, crean una frase bien formada</b>	7.14
<b>La obra generada respeta la tonalidad</b>	7.14
<b>Las notas de adorno generadas afectan la tonalidad</b>	2.86
<b>Las notas de adorno generadas rompen el discurso</b>	4.29
<b>Se abusa de las notas de adorno</b>	7.14
<b>Total</b>	5.86

**Gráfica 11. Aspectos básicos de la cadencia en valores**



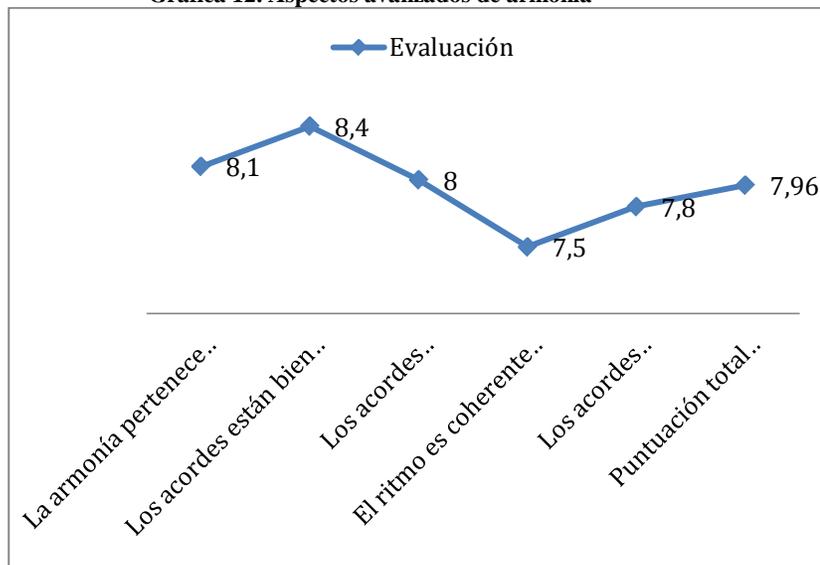
### **Análisis de la armonía**

Las siguientes tablas muestran la comparación de los aspectos avanzados a evaluar de la armonía generada. Los datos obtenidos son de evaluación numérica y el promedio se muestran en la Tabla 59.

**Tabla 59. Aspectos avanzados de la armonía en promedios**

<b>Criterio</b>	<b>Este método</b>
La armonía pertenece al estilo	8.1
Los acordes están bien formados	8.4
Los acordes pertenecen a los grados	8
El ritmo es coherente en sus componentes alto y bajo	7.5
Los acordes pertenecen a la tonalidad	7.8
<b>Puntuación total obtenida por cada herramienta</b>	<b>7.96</b>

**Gráfica 12. Aspectos avanzados de armonía**



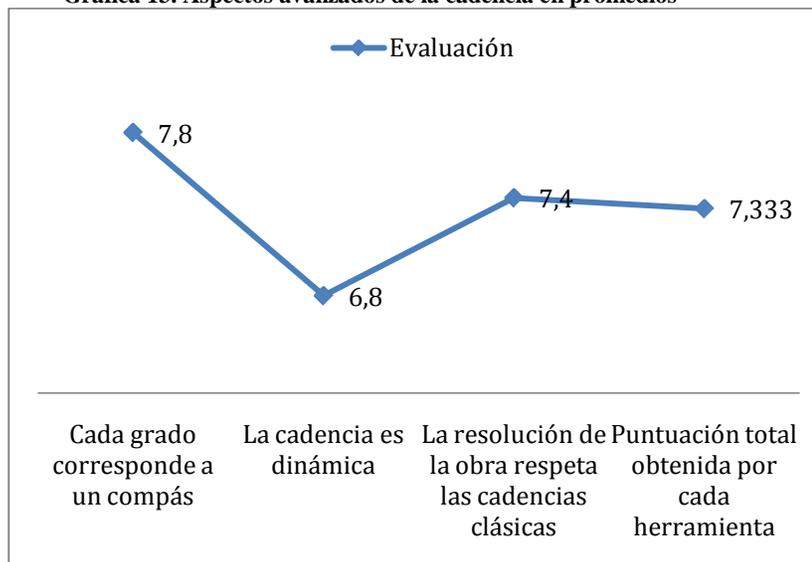
### **Análisis de la cadencia**

Las siguientes tablas muestran la comparación de los aspectos avanzados a evaluar de la cadencia generada. Los datos obtenidos son de evaluación numérica y el promedio se muestran en la Tabla 60.

**Tabla 60. Aspectos avanzados de la cadencia en promedios**

<b>Criterio</b>	<b>Este método</b>
Cada grado corresponde a un compás	7.8
La cadencia es dinámica	6.8
La resolución de la obra respeta las cadencias clásicas	7.4
<b>Puntuación total obtenida por cada herramienta</b>	<b>7.333</b>

**Gráfica 13. Aspectos avanzados de la cadencia en promedios**



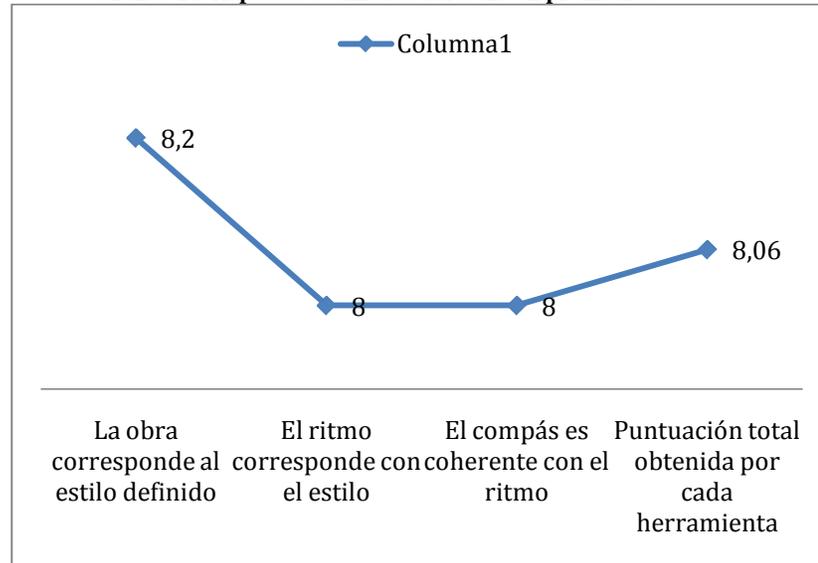
### **Análisis del estilo**

Las siguientes tablas muestran la comparación de los aspectos avanzados a evaluar del estilo generado. Los datos obtenidos son de evaluación numérica y el promedio se muestran en la Tabla 61.

**Tabla 61. Aspectos avanzados del estilo en promedios**

<b>Criterio</b>	<b>Este método</b>
<b>La obra corresponde al estilo definido</b>	8.2
<b>El ritmo corresponde con el estilo</b>	8
<b>El compás es coherente con el ritmo</b>	8
<b>Puntuación total obtenida por cada herramienta</b>	8.06

**Gráfica 14. Aspectos avanzados del estilo en promedios**



Para el análisis total de la obra generada se concentran los totales en la siguiente tabla.

**Tabla 62. Aspectos avanzados**

<b>Criterio</b>	<b>Este método</b>
<b>Melodía</b>	5.86
<b>Armonía</b>	7.96
<b>Cadencia</b>	7.33
<b>Estilo</b>	8.06

Del análisis de todos los datos, se concluye que es una obra musical completa, bien formada, con errores conceptuales ante los ojos de los expertos pero con buen sonido para las personas con conocimiento musical básico.

## **5.7 Evaluación comparativa y *test* de Turing**

Se ha realizado además un *test* de Turing a un grupo selecto de personas, esta muestra está compuesta por personas con un conocimiento musical avanzado, todos son miembros de distinguidas academias musicales de la ciudad de México.

La prueba consistió en lo siguiente:

1. Escuchar cuatro melodías diferentes. Estas melodías son:
  - **Humano:** Chopin. Balada No 4 en Fa menor, Op. 52 (inicio).
  - **Generado:** Wolfram tones. Melodía generada para piano en Do Mayor.
  - **Generado:** A musical generaton 3.0. Demo - Minimal pentatonix.
  - **Generado:** Este método. Una melodía generada por este método.
2. Decir si la habían escuchado anteriormente y si conocen los datos de cada una de las piezas.
3. Contestar si creen que la compuso un humano y porqué.
4. Contestar si creen que fue generada por computadora y porqué.
5. Dar un porcentaje para cada posibilidad.
6. Decidir si es composición humana o generada por computadora.
7. Dar datos de evaluación con fines de mejoramiento del método.

Los resultados fueron los que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 63. Resultados del test de Turing aplicado a 10 personas**

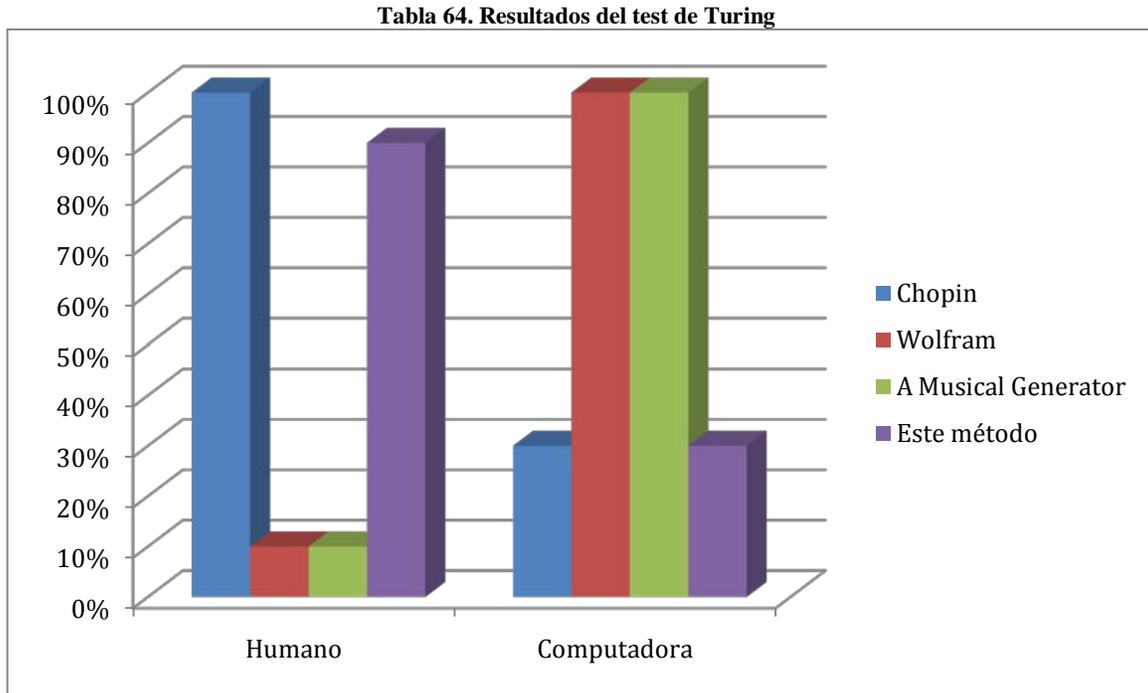
	<b>Chopin</b>	<b>Wolfram</b>	<b>A Musical Generator</b>	<b>Este método</b>
Humano	100%	10%	10%	90%
Computadora	30%	100%	100%	30%

Los datos anteriormente mostrados representan para la primer columna, que la melodía compuesta por Chopin obtiene un 100% de votos de que es compuesta por un humano pero 30% de la muestra piensa que también pudo ser compuesta por un generador.

Para la segunda columna, 10% opinan que fue compuesta por un humano y el 100% piensa que fue compuesto por un generador.

La tercera columna muestra que 10% de las personas creen que pudo ser compuesta por un humano, pero todos opinan que fue compuesto por un generador.

Para la columna que evalúa este método, el 90% opina que fue compuesta por un humano y solo el 30% opina que fue compuesto por un generador. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos.



Dados los datos anteriores, podemos afirmar que la melodía generada es aceptada como de un compositor humano. Pero esta gráfica no muestra que la mayoría de las personas opinó que fue compuesta, no por un experto, sino por un estudiante de música que va comenzando, dado que tiene varios errores teóricos.

Para esta evaluación se ha utilizado el *test* de Wilcoxon para datos no parametrizados, ya que no los datos pertenecen a una distribución normal.

Para crear los vectores se han propuesto los siguientes valores:

- 1 fue compuesta por un humano.
- 0 fue generado por un algoritmo.
- 1 no se puede definir si fue uno u otro.

Los vectores que se crean a partir de los datos son los siguientes:

```
chopin<-c(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1)
```

```
wolfram<-c(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1)
```

```
aMG<-c(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1)
```

```
metodoP<-c(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 0)
```

Y la hipótesis nula es que todos pertenecen al mismo grupo, es decir, todos fueron compuestos por humano.

Los resultados obtenidos son:

**Tabla 65. Datos obtenidos del test de Wilcox utilizando R**

	<b>Chopin</b>	
	<b>V</b>	<b>p-value</b>
Wolfram	35	0.1096
A Musical Generator	35	0.1096
Este método	0	1

La interpretación de estos datos es que Wolfram y A Musical Generator pertenecen a un grupo diferente al de Chopin y el método propuesto en este trabajo. Por lo que la hipótesis nula es falsa ya que existen dos grupos, y el grupo al que pertenece la obra generada por este método es la misma que la de Chopin, es decir, compuesta por humano.

---

---

### CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente capítulo se enuncian las conclusiones generales obtenidas a partir del trabajo realizado. Se menciona también el trabajo que queda por desarrollar como trabajo futuro.

#### 6.1 Conclusiones

- Para la representación y manipulación de la cadena de salida se ha concluyó que la notación ABC permite una flexibilidad apropiada, permitiendo usar los símbolos propios de esta representación en las mismas reglas propuestas.
- De la jerarquización realizada de una obra musical se ha concluido que la parte fundamental es el grado, ya que de ahí, se puede generar de manera paralela la armonía y la melodía. Además se concluyó que los intervalos relativos son la base para la definición de las reglas de producción.
- A partir de la jerarquización de la melodía se concluyó que la métrica en la división de valores de tiempo es la que define el tipo de nota en las posiciones según el acento y valores definidos.
- De los mecanismos de iteración para las partes que requieran repetición o modificación se concluye que las propuestas no son las únicas, ya que se puede trabajar en modificaciones de la misma sección para repeticiones contiguas o con diferente fin.
- Del método propuesto para la generación de música, se obtuvo un algoritmo para la construcción de la progresión de una pieza musical completa que coordina instrumentos definidos por gramáticas libres de contexto a partir de una gramática para la generación de cadencia para una sección musical.

- Con la abstracción del conocimiento musical, se ha conseguido satisfactoriamente aportar las reglas de producción básicas para la creación de una obra musical completa.
- Para el armado y generación de un archivo en notación ABC se ha desarrollado una herramienta que utiliza las reglas de producción propuestas y que arma la progresión total de la obra de manera algorítmica usando los parámetros del usuario para ello.

## 6.2 Aportaciones

- Para la coordinación de la pieza musical, se obtuvo una gramática formal libre de contexto para la generación de una progresión por sección compuesta por un número variable de compases definidos por el usuario. Esta gramática crea una progresión musical de tipo reposo-tensión que aporta la base para un discurso musical coherente.
- Para la parte melódica de la composición musical, se aporta una gramática libre de contexto para la implementación de un instrumento melódico para cada compás y dependiente de la cadencia. Para este instrumento se han generado reglas de producción basadas en la métrica temporal para asignar un tipo de nota en un momento dado para cada compás, lo que ha resultado en un buen desarrollo melódico para este instrumento.
- Para la parte armónica de la composición, se da una gramática libre de contexto para la implementación de un instrumento que requiere múltiples hilos coordinados con un ritmo para cada compás y dependientes de la cadencia. Las reglas de producción generan los acordes musicales dependiendo del tipo de modificador definido, es decir, la tensión que defina el usuario creando, además del ritmo, el tipo de acorde que se requiera para dar una tensión específica.
- En el caso de los instrumentos que marcan un estilo específico por su aporte tanto rítmico como melódico, se aporta una gramática libre de contexto para la implementación de un instrumento rítmico-melódico para cada compás que

depende de la cadencia. Las reglas para este instrumento son definidas muy rítmicamente, es decir, por repetición de tiempo similar en cada compás, pero usando las notas fundamentales para definir el grado.

- Todos estos instrumentos son generados a partir de una gramática libre de contexto para los componentes básicos musicales, desarrollando los intervalos relativos por cada definición a partir de la cadencia generada y finalizando la cadena con los terminales necesarios a partir de la tonalidad definida por el usuario.
- Para la generación de la cadena final de cada instrumento, se obtuvo un algoritmo para el procesamiento de la cadena para los intervalos, esto para mantener la gramática libre de contexto.
- Para la experimentación, se desarrolló también una herramienta que, a partir de gramáticas simples con peso probabilístico, genera un archivo básico de una melodía en notación ABC. Esta herramienta evolucionó para dar paso a una más completa.
- Con las gramáticas formales y algoritmos propuestos, se ha desarrollado un prototipo de herramienta basada en gramáticas generativas construidas de manera dinámica para la generación de composiciones musicales.

### **6.3 Trabajo futuro**

En el trabajo actual, la progresión total es definida por el usuario, esto puede generarse automáticamente basado en una gramática para la generación de progresión musical basada en estilos.

No se ha desarrollado un instrumento puramente rítmico por lo que existe trabajo en el desarrollo de instrumentos como percusiones.

La métrica ocupada en este trabajo es únicamente para compases de 4/4. Para trabajo futuro queda desarrollar la gramática para generar la métrica para tiempos compuestos.

Los valores de tiempo definidos en este trabajo son únicamente para tiempos pares. Se puede trabajar en la generación de valores de nota para tresillos según la métrica.

La resolución de la pieza en este trabajo es generado por el algoritmo que controla la progresión. Se puede trabajar en la gramática que genere un final para la progresión total de manera automática.

El tipo de instrumento armónico definido en este trabajo se basa en acordes completos. Se puede trabajar en la utilización de una armonía basa den arpeggios o contrapuntística.

Para las repeticiones hay que trabajar en diferentes patrones de modificación e iteración para cada compás o frase completa.

La intensidad de las voces es algo característico en la composición humana, por lo que también es un punto importante a trabajar a futuro.

## Referencias

- Alvaro, J.; Miranda, E. y Barros, B., (2005) “Representación del Conocimiento para la Composición Musical” en Spanish Association for Artificial Intelligence. *Proceedings of 11<sup>th</sup> Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence*. 16, 17 y 18 de Noviembre de 2005, Santiago de Compostela, España.
- Arcos, J.; Mántaras, R. y Serra X., (1998) “SaxEx: A Case-Based Reasoning System for Generating Expressive Musical Performances” en *Journal of New Music Research*. Vol. 27, número 3, pp. 194-210.
- Bel, B. y Kippen, J., (1992). “Bol Processor grammars” en Balaban, M., Ebcioğlu, K. y Laske, O. (ed.), *Understanding Music With AI*. AAAI, pp. 366-401.
- Biles, J.A. y GenJam, (1994) “A genetic algorithm for generating jazz solos” en Biles, J.A., GenJam, *Proceedings of ICMC '94*, DIEM.
- Black, J.A. y Ranjan, N., (2004) “Automated Event Extraction from Email. Computer Systems Laboratory Colloquium” en *NLP Stanford*. [En línea]. Disponible en: <http://nlp.stanford.edu/courses/cs224n/2004/jblack-final-report.pdf> [Revisado: 2009]
- Burton, A. y Vladimirova, T., (1999) “Generation of Musical Sequences with Genetic Techniques” en *Computer Music Journal*. Vol. 23, número 4, pp 59-73.
- Buzzanca, G., (2002) “A supervised learning approach to musical style recognition” en International Economics Development and Research Center. *2<sup>nd</sup> International Conference on Music and Artificial Intelligence*. IEDRC, 12, 13 y 14 de Septiembre de 2002, Edinburgo, Escocia.
- Chan, M. y Potter, J., (2006) “Recognition of Musically Similar Polyphonic Music”. Sydney, Australia, disponible en: [http://nguyendangbinh.org/Proceedings/ICPR/2006/DATA/D04\\_0549.PDF](http://nguyendangbinh.org/Proceedings/ICPR/2006/DATA/D04_0549.PDF) [Revisado: 2009]

- Chemillier, M., (2001) “Improvising Jazz Chord Sequences by Means of Formal Grammars”, en *Journées d'informatique musicale*, Imeb, Bourges, pp. 121-126.
- Chomsky, N., (1956) “Three models for the description of a language” en *IRE Transaction on Information Theory*. Vol. 2, número 3, pp. 113-124.
- Chomsky, N., (1965) *Aspects of the Theory of Syntax*. Cambridge, Massachussetts. MIT.
- Coker, J., (1987) *Improvising Jazz.*, New York, Fireside edition.
- Cope, D., (1991) *Computers and Musical Style*, Oxford, Inglaterra Oxford University.
- Cope, D., (1993) “A Computer Model of Music Composition” en *Machine Models of Music*. MIT.
- Cope, D., (2001) *Virtual Music: Computer Synthesis of Musical Style*. Cambridge, Massachussetts, MIT.
- Cruz-Alcázar, P.P. y Vidal-Ruiz, E., (2003) “Modeling Musical Style using Grammatical Inference Techniques: a Tool for Classifying and Generating Melodies” en Crombie, D.; Lenoir, R. y McKenzie, N. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference WEB Delivering of Music (WEDELMUSIC'03)*, 2003, Amsterdam, pp. 45-48.
- Diana, L. (2004) *An XML-based querying model for MIR applications within a multi layered music information environment*. Tesis de Doctorado. Milano, Universit ` a degli Studi di Milano, Department of Computer Science.
- Doraisamy, S., (2004) *Polyphonic Music Retrieval: The N-gram Approach*. Tesis de Doctorado (Philosophy in Computing). Londres, Inglaterra, University of London.
- Dörnenburg, E., (1997) *Extension of the EMILE algoritim for inductive learning of context-free grammars for natural languages*. Tesis de Maestría, Inglaterra, University oh Dortmund.

- Downie, J.S., (1999) *Evaluating A Simple Approach To Music Information Retrieval: Conceiving Melodic N-Grams As Text*. Tesis de Doctorado. Ontario, California. The University of Western Ontario.
- Endo, T.; Ito, S.; Mitsukura, Y. y Fukumi, M., (2008) “The Music Analysis Method Based on Melody Analysis” en *Control, Automation and Systems*. ICCAS 2008. Pp. 2559 – 2562
- Frankel-Goldwater, L., (2006) “Computers Composing Music: An Artistic Utilization of Hidden Markov Models for Music Composition” en *Journal of Undergraduate Research*. Vol. 5, número 1-2 (Fall 2006-Spring 2007), pp. 17-20
- Friberg, A., (1991) “Generative rules for musical performance: a formal description of a rule system”, *Computer Music Journal*. Vol. 15, numero 2, pp. 56-71.
- Fucks, W., (1962) “Mathematical analysis of formal structure of music” en *IRE Transactions on Information Theory*. Vol. 8, número 5, pp. 225-228.
- Gogins, M., (1991) “Iterated Function Systems Music” en *Computer Music Journal*, Vol. 15, número 1, pp. 40-48.
- Gold, E.M., (1967) “Language identification the limit” en Gold, E.M. *Information and Control*. Academic.
- Gómez-Zamalloa, M., (2009) “Sistema de Composición musical automática Aproximaciones Preliminares” en *4shared* [En línea]. España, disponible en: <http://dc193.4shared.com/doc/j05ROpRV/preview.html> [Revisado: 2009]
- Grachten, M., Arcos, J.L., y López de Mántaras, R., (2011) “TempoExpress, a CBR Approach to Musical Tempo Transformations”. *CiteSeer* [en línea], disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.9.9555> [Revisado: 2009]
- Griffith N. y Todd, P.M., (1999) *Musical Networks, Parallel Distributed Perception and Performance*. Inglaterra, MIT pp.227-260.

- Hilera, J.R.; González, R.J. y Gutierrez, J.A., (1998) “Composición musical vía computación neuronal” en *NOVATICA*. Número 133, pp. 60-64.
- Hiller, L. e Isaacson, L., (1957) *Illiad Suite Score*. New York, EUA, Theodore Presser Company.
- Hiller, L. e Isaacson, L., (1958) “Musical composition with a high-speed digital computer” en *Journal of Audio Engineering Society*. Vol. 6, pp. 154-60.
- Holtzman, S. R., (1996) *Digital Mantras: The Languages of Abstract and Virtual WorMs*. MIT.
- Horowitz, D., (1994) “Generating Rhythms with Genetic Algorithms” en. *AAAI'94 Proceedings of the twelfth national conference on Artificial intelligence*. Vol. 2
- Jarrett, S., (2008) *Music Composition for Dummies*. Jarrett, S. Holly Day.
- Johnson, C., (1999). “Exploring the sound-space of synthesis algorithms using interactive genetic algorithms” en *AISB99. Symposium on Musical Creativity*. AISB, Edinburgo, Escocia, pp. 20–27.
- Keller, R. M. y Morrison, D. R., (2007) “A Grammatical Approach to Automatic Improvisation” en *4<sup>th</sup> Sound and Music Computing Conference*. SMC, 11, 12 y 13 de Julio de 2007, Lefkada, Grecia.
- Khalifa, Y.; Shi, H.; Abreu, G.; Bonny, S. y Ziender, J., (2005) “Autonomous Evolutionary Music Composer” en *EvoMUSART workshop 2005*, Lausanne, 30 de marzo y 1 de abril de 2005.
- Kohonen, T. (1989) “A Self-Learning Musical Grammar or Associative Memory of the Second Kind” en *International Joint Conference Neural Networks, IJCNN*. 18-22 de Junio de 1989. Washington, DC, vol. 1, Pp. 1-5.
- Krumhansl, C., (2005) “The Geometry of Musical Structure: A Brief Introduction and History” en *Computers in Entertainment (CIE) archive*. Vol. 3, numero 4.

- Lerdahl, F. y Jackendoff, R., (1983) *A Generative Theory of Tonal Music*. Cambridge, Massachusetts, MIT.
- Lidov, D. y Gabura, J., (1973) “A melody writing algorithm using a formal language model” en Lidov, D., Gabura, J. *Computer Studies in the Humanities*.
- Lipschutz, S. y Lipson, M., (1997) *Theory and Problems of Discrete Mathematics*. Segunda edición. Estados Unidos de America, McGraw-Hill.
- Lopez de Mantaras, R. y Arcos, J.L., (2002) “AI and music: From composition to expressive performances” en *AI Magazine*. Vol. 23, número 3, pp. 43-57.
- Loy, G. y Abbott, C., (1985) “Programming Languages for Computer Music Synthesis, Performance and Composition” en *ACM Computing Surveys*. Vol. 17, número 2.
- Manning, C.D.; Raghavan, P. y Schütze, H., (2008) *Introduction To Information Retrieval*. Cambridge, Inglaterra. Cambridge University.
- Marques, M., Oliveira, V., Vieira, S. y Rosa A.C., (2000) “Music Composition Using Genetic Evolutionary Algorithms” en *Proc. of the Congress of Evolutionary Computation*. Vol. 1, pp. 2000.
- Maurer, P. M., (1990) “Generating test data with enhanced context-free grammars” en *IEEE Software*. Vol. 7, número 4, pp. 50–55.
- McAlpine, K., Miranda, E. R. y Hogar, S., (1999) “Composing Music with Algorithms: A Case Study System” en *Computer Music Journal*. Vol. 23, número 2, pp. 19–30.
- McCormack, J., (1996) “Grammar-based music composition” en *Complex International*. Vol. 3.
- Minsky, M., (1993) “Music, Mind and Meaning” en Schwanauer, S.M. y Levitt, D.A. (eds.), *Machine Models of Music*, MIT.
- Mitchell, W.J., (1965) *Elementary Harmony*. Tercera edición. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.

- Narmour, E., (1990) *The Analysis and cognition of basic melodic structures : the implication-realization model*. University of Chicago.
- Newcomb, S.R., (1991) “Standard Music Description Language”, *Journal Computer*. Vol. 24, número 7.
- Núñez, A., (1993) *Informática y Electrónica Musical*. España, Paraninfo.
- Oliwa, T. M., (2008) “Genetic Algorithms and the abc Music Notation Language for Rock Music Composition” en *Genetic and evolutionary computation. Proceedings of the 10<sup>th</sup> annual conference, Atlanta*, pp. 1603-1610.
- Ortega, A.; Sánchez, R. y Alfonseca, M., (2007) “Automatic composition of music by means of Grammatical Evolution” en *The 6<sup>th</sup> Joint Meeting on European software engineering conference and the ACM SIGSOFT symposium on the foundations of software engineering: companion papers*. 3, 4, 5, 6 y 7 de septiembre de 2007, Dubrovnik, Croatia, POSTER SESSION: ESEC/FSE'07, pp. 553-556
- Papadopoulos, G. y Wiggins, G., (1990) “AI Methods for Algorithmic Composition: A Survey, a Critical View and Future Prospects”. *CiteSeerX*, disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.3.8064> [Revisado: 2009]
- Pereira, F.C.; Grilo, C.; Macedo, L. y Cardoso, A., (1997) “Composing Music with Case-Based Reasoning”, en *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Conference on Computational Models of Creative Cognition*. MIND-II, September 1997, Dublin, Irlanda.
- Pollard, C.J. y Sag, I. A., (1994) *Head Driven Phrase Structures Grammar*. The University of Chicago.
- Prusinkiewicz, P., (1986) “Score generation with L-systems” en *Proceedings of the 1986 International Computer Music Conference*, pp.455-457.
- Rader, G. M., (1996) “Creating Printed Music Automatically”. *Mesa state* [en línea], Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer (IEEE), disponible en: <http://home.mesastate.edu/~grader/ieeeme.pdf> , [Revisado: 2009]

- Rader, G.M., (1973) “An algorithm for the automatic composition of simple forms of music based on a variation of formal grammars” en *Moore School Rep. No. 73-09*. Filadelfia.
- Roads, C., (1979) “Grammars as Representations for Music” en *Computer Music Journal*. Vol. 3, número 1.
- Roads, C., (1985) “Research in music and artificial intelligence”. *Annual meeting of the Italian Computer Society*. Italian Computer Society. 1 y 2 de June de 1985, Padua, Italia, pp. 163-190.,
- Roads, C., (1985) *Foundations of Computer Music*, Roads, C. Boston, Massachusetts, MIT.
- Roads, C., (1996) *The Computer Music Tutorial*. Roads, C. Cambridge, Massachusetts MIT.
- Rolland, P.Y., (1999) “Discovering patterns in musical sequences” en *Journal of New Music Research*. Vol. 28, número 4, pp. 334–350.
- Salton, G. y Buckley, C., (1988) “Term weighting approaches in automatic text retrieval” en *Information Processing and Management*. Vol. 24, número 5, pp. 513-523.
- Selfridge-Field, E., (1997) *Beyond MIDI, the Handbook of Musical Codes*. Cambridge, Massachusetts, MIT.
- Sheikholharam, P. y Teshnehlab, M., (2008) “Music Composition Using Combination of Genetic Algorithms and Kohonen Grammar” en Sheikholharam, P. y Teshnehlab, M. (comp.). *International Symposium on Computational Intelligence and Design, 2008*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 17 y 18 de Octubre de 2008. Wuhan, China, IEEE.
- Smith, S. M. y Williams, G. N., (1997) “A Visualization of Music” en *Visualization*. 8<sup>th</sup> IEEE Visualization 1997 (VIS '97), 19-24 de octubre de 1997, Phoenix, Arizona, pp.499.

- Smoliar, S., (1993) "Process Structuring and Music Theory" en Schwanauer, S.M. y Levitt, D.A. (eds.), *Machine Models of Music*. MIT.
- Srinivasan, S.H., (2004) "Characterizing music dynamics for improvisation" en *International Conference Multimedia and Expo*. IEEE, 27, 28 y 30 de junio de 2004, pp. 1339-1342.
- Steedman, M. J., (1984) "A Generative Grammar for Jazz Chord Sequences" en *Music Perception*. Vol. 2, número 1.
- Thomason, M. y Gonzalez, R., (1975) "Syntactic Recognition of Imperfectly Specified Patterns," en *IEEE Transactions on Computers*. Vol. 24, número 1, pp. 93-95.
- Ulrich, W., (1977) "The analysis and synthesis of jazz by computer" en *Artificial Intelligence*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Joint Conference. Los Altos, California.
- Van Zaanen, M. y Adriaans, P.W., (2001) *Comparing two unsupervised Grammar Induction Systems: Alignment-Based Learning vs. EMILE*, Research Report. Leeds, Inglaterra, University of Leeds.
- Van Zaanen, M., (2000) "Alignment-Based Learning" en *Proceeding the 18<sup>th</sup> International Conference on Computational Linguistics, COLING*, pp. 961-967.
- Vervoort, M., (2004) "Emile 4.1.7 User Guide" en *Staff science UVA*. Londres, disponible en: <http://staff.science.uva.nl/~pietera/Emile/manual.pdf> [Accesado: 2011]
- Winograd, T., (1968). "Linguistics and the computer analysis of tonal harmony". *Journal of Music Theory*. Vol.12, número 1, primavera de 1968, pp. 12,249.
- Winograd, T., (1973). "A procedural model of language understanding" en Schank, R. y Colby, K. (Comp.), *Computer Models of Thought and Language*. San Francisco, Freeman.
- Xenakis, I., (1971) *Formalized Music*. Bloomington, Indiana University.

Xiaoyu, S. y Yongchuan, T., (2009) “Automatic Music Emotion Classification Using a New Classification Algorithm”, en *Computational Intelligence and Design*. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), vol. 2, pp.540-542, Changsha, China.

## Anexos

### 8.1 Gramáticas

En esta sección se detallan las gramáticas aportadas para la generación de música.

#### 8.1.1 Gramática de la cadencia

Esta gramática formal libre de contexto genera la cadencia por sección que va a controlar el resto de los instrumentos.

$w \rightarrow \textit{paso}$   
 $\textit{reposo} \rightarrow \textit{reposo tension}$   
 $\textit{tension} \rightarrow \textit{paso tension}$   
 $\textit{paso} \rightarrow \textit{tension paso}$   
 $\textit{paso} \rightarrow \textit{paso paso}$   
 $\textit{paso} \rightarrow \textit{paso reposo}$   
 $\textit{paso} \rightarrow \textit{reposo paso}$   
 $\textit{reposo} \rightarrow I$   
 $\textit{reposo} \rightarrow VI$   
 $\textit{paso} \rightarrow IV$   
 $\textit{paso} \rightarrow II$   
 $\textit{tension} \rightarrow V$   
 $\textit{tension} \rightarrow III$

#### 8.1.2 Implementación de un instrumento melódico

Esta gramática formal libre de contexto genera la melodía por compás basándose en la estructura métrica de tiempo.

$w \rightarrow F8/$	$D4/ \rightarrow D2/ d2/$
$F8/ \rightarrow Fz8/$	$D4/ \rightarrow D2/ dz2/$
$F8/ \rightarrow F8/$	$D4/ \rightarrow Dz2/ d2/$
$F8/ \rightarrow f4/ D4/$	$Dz4/ \rightarrow Dz4/$
$F8/ \rightarrow f4/ Dz4/$	$Dz4/ \rightarrow D2/ d2/$
$F8/ \rightarrow fz4/ D4/$	$Dz4/ \rightarrow D2/ dz2/$
$Fz8/ \rightarrow f4/ D4/$	$Dz4/ \rightarrow Dz2/ d2/$
$Fz8/ \rightarrow f4/ Dz4/$	$fz4/ \rightarrow fz4/$
$Fz8/ \rightarrow fz4/ D4/$	$fz4/ \rightarrow f2/ d2/$
$f4/ \rightarrow f4/$	$fz4/ \rightarrow f2/ dz2/$
$f4/ \rightarrow f2/ d2/$	$fz4/ \rightarrow fz2/ d2/$
$f4/ \rightarrow f2/ dz2/$	$f2/ \rightarrow f2/$
$f4/ \rightarrow fz2/ d2/$	$f2/ \rightarrow f/ d/$
$D4/ \rightarrow D4/$	$f2/ \rightarrow f/ dz/$

$f2/ \rightarrow fz/ d/$   
 $d2/ \rightarrow d2/$   
 $d2/ \rightarrow d/ d/$   
 $d2/ \rightarrow d/ dz/$   
 $d2/ \rightarrow dz/ d/$   
 $dz2/ \rightarrow dz2/$   
 $dz2/ \rightarrow d/ d/$   
 $dz2/ \rightarrow d/ dz/$   
 $dz2/ \rightarrow dz/ d/$   
 $fz2/ \rightarrow fz2/$   
 $fz2/ \rightarrow f/ d/$   
 $fz2/ \rightarrow f/ dz/$   
 $fz2/ \rightarrow fz/ d/$   
 $D2/ \rightarrow D2/$   
 $D2/ \rightarrow D/ d/$   
 $D2/ \rightarrow D/ dz/$   
 $D2/ \rightarrow Dz/ d/$   
 $Dz2/ \rightarrow Dz2/$   
 $Dz2/ \rightarrow D/ d/$   
 $Dz2/ \rightarrow D/ dz/$   
 $Dz2/ \rightarrow Dz/ d/$   
 $f/ \rightarrow f/$   
 $f/ \rightarrow f// d//$   
 $f/ \rightarrow f// dz//$   
 $f/ \rightarrow fz// d//$   
 $d/ \rightarrow d/$   
 $d/ \rightarrow d// d//$   
 $d/ \rightarrow d// dz//$   
 $d/ \rightarrow dz// d//$   
 $dz/ \rightarrow dz/$   
 $dz/ \rightarrow d// d//$   
 $dz/ \rightarrow d// dz//$   
 $dz/ \rightarrow dz// d//$   
 $fz/ \rightarrow fz/$   
 $fz/ \rightarrow f// d//$   
 $fz/ \rightarrow f// dz//$   
 $fz/ \rightarrow fz// d//$   
 $D/ \rightarrow D/$   
 $D/ \rightarrow D// d//$   
 $D/ \rightarrow D// dz//$   
 $D/ \rightarrow Dz// d//$   
 $Dz/ \rightarrow Dz/$   
 $Dz/ \rightarrow D// d//$   
 $Dz/ \rightarrow D// dz//$   
 $Dz/ \rightarrow Dz// d//$   
 $f// \rightarrow f//$

$f// \rightarrow f/// d///$   
 $f// \rightarrow f/// dz///$   
 $f// \rightarrow fz/// d///$   
 $d// \rightarrow d//$   
 $d// \rightarrow d/// d///$   
 $d// \rightarrow d/// dz///$   
 $d// \rightarrow dz/// d///$   
 $dz// \rightarrow dz//$   
 $dz// \rightarrow d/// d///$   
 $dz// \rightarrow d/// dz///$   
 $dz// \rightarrow dz/// d///$   
 $fz// \rightarrow fz//$   
 $fz// \rightarrow f/// d///$   
 $fz// \rightarrow f/// dz///$   
 $fz// \rightarrow fz/// d///$   
 $D// \rightarrow D//$   
 $D// \rightarrow D/// d///$   
 $D// \rightarrow D/// dz///$   
 $D// \rightarrow Dz/// d///$   
 $Dz// \rightarrow Dz//$   
 $Dz// \rightarrow D/// d///$   
 $Dz// \rightarrow D/// dz///$   
 $Dz// \rightarrow Dz/// d///$   
 $f/// \rightarrow f///$   
 $f/// \rightarrow f//// d////$   
 $f/// \rightarrow f//// dz////$   
 $f/// \rightarrow fz//// d////$   
 $d/// \rightarrow d///$   
 $d/// \rightarrow d//// d////$   
 $d/// \rightarrow d//// dz////$   
 $d/// \rightarrow dz//// d////$   
 $dz/// \rightarrow dz///$   
 $dz/// \rightarrow d//// d////$   
 $dz/// \rightarrow d//// dz////$   
 $dz/// \rightarrow dz//// d////$   
 $fz/// \rightarrow fz///$   
 $fz/// \rightarrow f//// d////$   
 $fz/// \rightarrow f//// dz////$   
 $fz/// \rightarrow fz//// d////$   
 $D/// \rightarrow D///$   
 $D/// \rightarrow D//// d////$   
 $D/// \rightarrow D//// dz////$   
 $D/// \rightarrow Dz//// d////$   
 $Dz/// \rightarrow Dz///$   
 $Dz/// \rightarrow D//// d////$   
 $Dz/// \rightarrow D//// dz////$

*Dz/// → Dz//// d////*

*F8/ → fundamental 8/  
Fz8/ → z8  
f4/ → acorde 4/  
D4/ → acorde 4/  
Dz4/ → z4/  
fz4/ → z4/  
f2/ → acorde 2/  
d2/ → escala 2/  
dz2/ → z2/  
fz2/ → z2/  
D2/ → acorde 2/  
Dz2/ → z2/  
f/ → acorde /  
d/ → escala /  
dz/ → z/  
fz/ → z/  
D/ → escala /  
Dz/ → z/  
I | acorde → fundamental  
I | acorde → tercera  
I | acorde → quinta  
II | acorde → segunda  
II | acorde → cuarta  
II | acorde → sexta  
III | acorde → tercera  
III | acorde → quinta  
III | acorde → septima  
IV | acorde → cuarta  
IV | acorde → sexta  
IV | acorde → octava  
V | acorde → quinta  
V | acorde → septima  
V | acorde → novena  
VI | acorde → sexta  
VI | acorde → octava  
VI | acorde → decima  
VII | acorde → septima  
VII | acorde → novena  
VII | acorde → onceava*

*f// → acorde //  
d// → cromatica //  
dz// → z//  
fz// → z//  
D// → escala //  
Dz// → z//  
f/// → acorde ///  
d/// → cromatica ///  
dz/// → z///  
fz/// → z///  
D/// → escala ///  
Dz/// → z///  
f//// → acorde ////  
d//// → cromatica ////  
dz//// → z////  
fz//// → z////  
D//// → escala ////  
Dz//// → z////*

### 8.1.3 Implementación de un instrumento armónico

Esta gramática formal libre de contexto genera la armonía por compás basándose en un ritmo definido y acordes según el estilo.

$w \rightarrow alto$

$contraAlto \mid alto \rightarrow z2/ acordes 2/ z2/ acordes 2/$

$largo \mid alto \rightarrow acordes 8/$

$0 \mid acordes \rightarrow \begin{bmatrix} acorde1 \\ acorde2 \\ acorde3 \end{bmatrix}$

$7 \mid acordes \rightarrow \begin{bmatrix} acorde1 \\ acorde2 \\ acorde3 \\ acorde4 \end{bmatrix}$

$I \mid acorde1 \rightarrow fundamental$

$I \mid acorde2 \rightarrow tercera$

$I \mid acorde3 \rightarrow quinta$

$I \mid acorde4 \rightarrow septima$

$II \mid acorde1 \rightarrow segunda$

$II \mid acorde2 \rightarrow cuarta$

$II \mid acorde3 \rightarrow sexta$

$II \mid acorde4 \rightarrow octava$

$III \mid acorde1 \rightarrow tercera$

$III \mid acorde2 \rightarrow quinta$

$III \mid acorde3 \rightarrow septima$

$III \mid acorde4 \rightarrow novena$

$IV \mid acorde1 \rightarrow cuarta$

$IV \mid acorde2 \rightarrow sexta$

$IV \mid acorde3 \rightarrow octava$

$IV \mid acorde4 \rightarrow decima$

$V \mid acorde1 \rightarrow quinta$

$V \mid acorde2 \rightarrow septima$

$V \mid acorde3 \rightarrow novena$

$V \mid acorde4 \rightarrow onceava$

$VI \mid acorde1 \rightarrow sexta$

$VI \mid acorde2 \rightarrow octava$

$VI \mid acorde3 \rightarrow decima$

$VI \mid acorde4 \rightarrow doceava$

$VII \mid acorde1 \rightarrow septima$

$VII \mid acorde2 \rightarrow novena$

$VII \mid acorde3 \rightarrow onceava$

$VII \mid acorde4 \rightarrow treceava$

#### 8.1.4 Implementación de un instrumento rítmico-melódico.

Esta gramática formal libre de contexto genera un instrumento rítmico-melódico por compás basándose en un ritmo definido y las notas fundamentales.

$w \rightarrow bajo$

$bajoTiempo \mid bajo \rightarrow acorde1 - 12\ 2/ z2/ acorde3 - 12\ 2/ z2/$

$bajoTiempo2 \mid bajo \rightarrow acorde1 - 12\ 4/ acorde3 - 12\ 4/$

$largo \mid bajo \rightarrow acorde1 - 12\ 8/$

$cumbia \mid bajo \rightarrow acorde1 - 12\ 4/ acorde2 - 12\ 2/ acorde3 - 12\ 2/$

#### 8.1.5 Componentes musicales básicos

Estas reglas de producción trabajan a partir de la cadena generada por la definición de cada uno de los instrumentos, es complemento común para completar las gramáticas formales libres de contexto antes descritas.

$escala \rightarrow fundamental$

$escala \rightarrow segunda$

$escala \rightarrow tercera$

$escala \rightarrow cuarta$

$escala \rightarrow quinta$

$escala \rightarrow sexta$

$escala \rightarrow septima$

$cromatica \rightarrow primera$

$cromatica \rightarrow segundaMin$

$cromatica \rightarrow segundaMaj$

$cromatica \rightarrow segundaAug$

$cromatica \rightarrow terceraMaj$

$cromatica \rightarrow cuartaJst$

$cromatica \rightarrow cuartaAug$

$cromatica \rightarrow quintaJst$

$cromatica \rightarrow quintaAug$

$cromatica \rightarrow sextaMaj$

$cromatica \rightarrow sextaAug$

$cromatica \rightarrow septimaMaj$

$cromatica \rightarrow septimaAug$

$mayor \mid fundamental \rightarrow primera$

$mayor \mid segunda \rightarrow segundaMaj$

$mayor \mid tercera \rightarrow terceraMaj$

$mayor \mid cuarta \rightarrow cuartaJst$

$mayor \mid quinta \rightarrow quintaJst$

$mayor \mid sexta \rightarrow sextaMaj$

$mayor \mid septima \rightarrow septimaMaj$

$mayor \mid octava \rightarrow fundamental$

$mayor \mid novena \rightarrow segunda$

$mayor \mid decima \rightarrow tercera$

$mayor \mid onceava \rightarrow cuarta$

$mayor \mid doceava \rightarrow quinta$

$mayor \mid treceava \rightarrow sexta$

*primera* → 0  
*primera* → 0  
*primeraMaj* → 0  
*primeraAug* → 1  
*segundaDim* → 0  
*segundaMin* → 1  
*segundaMaj* → 2  
*segundaAug* → 3  
*terceraDim* → 2  
*terceraMin* → 3  
*terceraMaj* → 4  
*terceraAug* → 5  
*cuartaDim* → 4  
*cuartaJst* → 5  
*octavaMaj* → *primera* + 13  
*octavaAug* → *primeraAug* + 13  
*novenaDim* → *segundaDim* + 13  
*novenaMin* → *segundaMin* + 13  
*novenaMaj* → *segundaMaj* + 13  
*novenaAug* → *segundaAug* + 13  
*decimaDim* → *terceraDim* + 13  
*decimaMin* → *terceraMin* + 13  
*decimaMaj* → *terceraMaj* + 13  
*decimaAug* → *terceraAug* + 13  
*onceavaDim* → *cuartaDim* + 13  
*onceavaJst* → *cuartaJst* + 13  
*onceavaAug* → *cuartaAug* + 13  
*doceavaDim* → *quintaDim* + 13  
*doceavaJst* → *quintaJst* + 13  
*doceavaAug* → *quintaAug* + 13  
*treceavaDim* → *sextaDim* + 13  
*treceavaMin* → *sextaMin* + 13  
*treceavaMaj* → *sextaMaj* + 13  
*treceavaAug* → *sextaAug* + 13

*cuartaAug* → 6  
*quintaDim* → 6  
*quintaJst* → 7  
*quintaAug* → 8  
*sextaDim* → 7  
*sextaMin* → 8  
*sextaMaj* → 9  
*sextaAug* → 10  
*septimaDim* → 9  
*septimaMin* → 10  
*septimaMaj* → 11  
*septimaAug* → 12  
*octavaDim* → 12

En esta sección es necesario procesar la cadena generada para realizar la suma de los valores. De usarse una gramática para resolver la cadena, no será libre de contexto.

0 → C,,	6 → ^F,,	12 → C,
1 → ^C,,	7 → G,,	13 → ^C,
2 → D,,	8 → ^G,,	14 → D,
3 → ^D,,	9 → A,,	15 → ^D,
4 → E,,	10 → ^A,,	16 → E,
5 → F,,	11 → B,,	17 → F,

18 → $\wedge F$ ,	36 → $c$	54 → $\wedge f'$
19 → $G$ ,	37 → $\wedge c$	55 → $g'$
20 → $\wedge G$ ,	38 → $d$	56 → $\wedge g'$
21 → $A$ ,	39 → $\wedge d$	57 → $a'$
22 → $\wedge A$ ,	40 → $e$	58 → $\wedge a'$
23 → $B$ ,	41 → $f$	59 → $b'$
24 → $C$	42 → $\wedge f$	60 → $c''$
25 → $\wedge C$	43 → $g$	61 → $\wedge c''$
26 → $D$	44 → $\wedge g$	62 → $d''$
27 → $\wedge D$	45 → $a$	63 → $\wedge d''$
28 → $E$	46 → $\wedge a$	64 → $e''$
29 → $F$	47 → $b$	65 → $f''$
30 → $\wedge F$	48 → $c'$	66 → $\wedge f''$
31 → $G$	49 → $\wedge c'$	67 → $g''$
32 → $\wedge G$	50 → $d'$	68 → $\wedge g''$
33 → $A$	51 → $\wedge d'$	69 → $a''$
34 → $\wedge A$	52 → $e'$	70 → $\wedge a''$
35 → $B$	53 → $f'$	71 → $b''$

## 8.2 Archivo generado

```

X:1
T: Primera!!
C:
M:C
L:1/4
Q:120
K:C
%%MIDI program 1
%
V:1          clef=treble-8  name="melodia"   snm="T.I"
V:2          clef=treble-8  name="Acordes"   snm="T.I"
V:3          clef=treble-8  name="Bajo"      snm="T.I"
%
[V:1]c2/d2/a2/g2/ |z/d/z/d/z/c/e/z/ |c2/e2/c2/z2/ |f4/c4/
|c2/d2/a2/g2/ |z/d/z/d/z/c/e/z/ |c2/e2/c2/z2/ |f4/c4/
|C/z/B/z/E/E/z/E/ |F/F/z2/z/B/A2/ |C4/A2/E2/ |z2/D2/D/z/C2/
|C/z/B/z/E/E/z/E/ |F/F/z2/z/B/A2/ |C4/A2/E2/ |z2/D2/D/z/C2/ |E4/B2/D2/
|F/A/F/z/z/F/G/C/ |G4/E4/ |C/z/G2/z/G/E/D/ |c8/|]
[V:2] z2/[FAC]2/z2/[FAC]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/ |z2/[CEG]2/z2/[CEG]2/
|z2/[FAC]2/z2/[FAC]2/ |z2/[FAC]2/z2/[FAC]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/
|z2/[CEG]2/z2/[CEG]2/ |z2/[FAC]2/z2/[FAC]2/ |z2/[ACE]2/z2/[ACE]2/
|z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/
|z2/[ACE]2/z2/[ACE]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/
|z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/ |z2/[CEG]2/z2/[CEG]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/
|z2/[EGB]2/z2/[EGB]2/ |z2/[DFA]2/z2/[DFA]2/ |[CEG]8/|]
[V:3] F,4/c4/ |D,4/A,4/ |c4/G,4/ |F,4/c4/ |F,4/c4/ |D,4/A,4/ |c4/G,4/
|F,4/c4/ |A,4/E,4/ |D,4/A,4/ |D,4/A,4/ |D,4/A,4/ |A,4/E,4/ |D,4/A,4/
|D,4/A,4/ |D,4/A,4/ |c4/G,4/ |D,4/A,4/ |E,4/B,4/ |D,4/A,4/ |C8/|]

```